



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Treball realitzat per:

Edgar Vacas Navalón

Dirigit per:

Ignacio Carol Vilarasau

Joaquín Liaudat

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 19 de juny del 2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a los tutores de esta tesis, Ignacio Carol Vilarasau y Joaquín Liaudat, por todos los conocimientos traspasados.

A mis padres por brindarme la oportunidad de estudiar en esta escuela.

También a todos los compañeros y amigos que me han servido de apoyo durante todos estos cursos para superar las diversas dificultades.

Abstract

Title Experimental study of the influence of the stress state in the expansions by Alkali-Silica Reaction in concrete

Author Edgar Vacas Navalón

Tutor Ignacio Carol Vilarasau y Joaquín Liaudat

The Alkali-Silica Reaction is the combination of certain forms of silica present in determinate aggregates, and the alkalis (sodium and potassium) and calcium usually present in the water of the concrete pores. This reaction might form an expansive gel inside the microstructure of the concrete, which causes important expansions in the material and propagation of cracks in the worst cases. As a result, the ASR effect can damage the general deterioration of the structure and its durability. The types of structures usually affected by the ASR are bridges and dams.

This experimental study is part of a bigger research carried out by the group MECMAT (UPC), which is focussed on the development of tests for the investigation of ASR. This thesis took part with the realization of experiments to study the influence of the stress state in the expansions of concrete test cubes.

The tests are developed in the AAR-Triaxial Machine, a special device that allows applying a determinate stress conditions during the confinement of the test cube. The originality respect other experiments is the possibility of consider different value of load for each axis simultaneously. The main goal is contribute a consistent basis of experimental results in order to complete many numerical models that have been developed previously.

Moreover, it is also realized an additional tests with a particular type of basaltic aggregate of natural origin. The purpose is applying this basaltic aggregate in future tests cubes for the AAR-TM, so it is needed to carry out tests of free expansion in order to typify the aggregate behaviour against the ASR.

Along this thesis are exposed all the steps executed in the achievement of this experiments. It is explained the complete procedure of specimen preparation (materials, elaboration of test cubes, process, data acquisition and results). Also each part of the experimental methodology is defined and finally, it is shown the discussion of the results.

Resumen

Título Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Autor Edgar Vacas Navalón

Tutor Ignacio Carol Vilarasau y Joaquín Liaudat

La Reacción Álcali-Sílice es la combinación de ciertas formas de sílice presentes en determinados áridos, y los iones álcalis (sodio y potasio) y calcio normalmente presentes en el agua de los poros del hormigón. Esta reacción puede formar un gel expansivo en la microestructura del hormigón, causando importantes expansiones en el material y propagación de fisuras, en los peores casos. Como resultado, el efecto de la RAS puede perjudicar el deterioro global de la estructura y su durabilidad. Los tipos de estructuras normalmente afectadas por la RAS son puentes y presas.

Este estudio experimental forma parte de una investigación más amplia llevada a cabo por el grupo MECMAT (UPC), el cual se centra en el desarrollo de ensayos para la investigación de la RAS. Esta tesis participa en la realización de experimentos para el estudio de la influencia de los estados tensionales en las expansiones de probetas cúbicas.

Los ensayos se desarrollan en la AAR-Triaxial Machine, un aparato especial que permite aplicar un determinado estado tensional durante el confinamiento de la probeta cúbica. La originalidad respecto otros experimentos es la posibilidad de considerar diferentes valores de carga para cada eje simultáneamente. El objetivo principal es contribuir a una base consistente de resultados experimentales con el objetivo de completar los numerosos modelos numéricos desarrollados previamente.

Además, se han realizado ensayos adicionales con un particular tipo de árido basáltico de origen natural. El propósito es utilizar este árido basáltico en futuras probetas cúbicas para la AAR-TM, por eso es necesario llevar a cabo ensayos de expansión libre para caracterizar el comportamiento del árido ante la RAS.

A lo largo de este trabajo, son expuestos todos los pasos ejecutados para la realización de los experimentos. Se explica el procedimiento completo de elaboración de probetas (materiales, proceso, etc.). También, cada parte de la metodología experimental es definida y finalmente, se muestra la discusión de los resultados.

Índice

Índice de tablas.....	6
Índice de figuras.....	7
1. Introducción.....	10
1.1. Presentación.....	10
1.2. Motivación y objetivo.....	10
1.3. Contenido.....	11
2. Reacción Álcali-Sílice (RAS).....	11
2.1. Introducción.....	11
2.2. Descripción de la RAS.....	12
2.3. Factores que afectan a la RAS.....	14
Humedad ambiental.....	14
Temperatura.....	14
Contenido de álcalis del hormigón.....	15
Contenido y tipo de sílice reactiva.....	16
Contenido y granulometría del árido reactivo.....	17
Estado tensional del hormigón.....	18
2.4. Efectos de la RAS en el hormigón.....	19
Microfisuración del hormigón.....	19
Macrofisuración del hormigón.....	21
Popouts.....	21
Degradación en las propiedades del hormigón.....	22
3. Ensayos de expansión confinada con probetas de vidrio triturado.....	23
3.1. Introducción.....	23
3.2. Descripción del equipo.....	23
1) Subsistema de carga.....	24
2) Subsistema de circulación de líquidos.....	26
3) Subsistema de control de temperatura.....	28
4) Subsistema de medición de deformaciones.....	28
5) Subsistema de control y adquisición de datos.....	29
3.3. Elaboración de probetas.....	32
Probetas.....	32
Proceso de elaboración.....	35
3.4. Metodología de ensayo.....	38
Ensayos de expansión libre.....	39

**Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción
Álcali-Sílice en hormigón**

Ensayos de expansión confinada en AAR-TM	40
3.5. Resultados	42
Ensayo de expansión libre (0-0-0).....	42
Ensayos de expansión confinada 1-1-1.....	45
Ensayos de expansión confinada 9-9-1.....	48
3.6. Discusión de resultados para ensayos de expansión confinada	52
4. Ensayos de expansión libre con mortero de árido de basáltico	54
4.1. Introducción	54
4.2. El árido basáltico	54
4.3. Elaboración de probetas.....	56
Materiales.....	56
Dosificación	57
Proceso de elaboración.....	57
4.4. Metodología de ensayo.....	60
Instrumentos de medida	61
Proceso de adquisición de datos.....	62
Cálculos	64
4.5. Resultados	64
Etapa de Curado.....	64
Etapa de Exposición	66
Registro completo	68
Probetas afectadas.....	74
4.6. Discusión de resultados	75
Variación específica del peso	75
Deformación específica.....	76
Relación peso-deformación	76
5. Conclusiones y propuestas.....	76
Referencias.....	79

Índice de tablas

Tabla 3.1 Características y especificaciones técnicas de la AAR-Triaxial Machine	31
Tabla 3.2 Valores de dosificación de las probetas.....	33
Tabla 3.3 Granulometría de las probetas de control.....	33
Tabla 3.4 Granulometría de las probetas activas	34
Tabla 3.5 Composición química CEM I 42.5R en % de peso.....	34
Tabla 3.6 Dosificación absoluta para 5 probetas cúbicas	35
Tabla 3.7 Probetas cúbicas utilizadas en ensayo de expansión libre.....	39
Tabla 3.8 Probetas utilizadas en ensayo de expansión confinada 1-1-1.	40
Tabla 3.9 Probetas utilizadas en ensayo de expansión confinada 9-9-1	40
Tabla 4.2 Identificación probetas de árido natural utilizadas en el ensayo de expansión libre.....	56
Tabla 4.3 Granulometría del árido.....	57
Tabla 4.4 Valores de dosificación de las probetas.....	57
Tabla 4.5 Dosificación absoluta para 4 probetas cilíndricas	57
Tabla 4.6 Frecuencia de registro de medidas de las distintas etapas del experimento	63

Índice de figuras

Figura 2.1 Efecto de la humedad relativa del hormigón en las expansiones por RAS (Swamy, 1992).....	14
Figura 2.2 Comparación de parámetros de expansión con probetas a 20°C y 40°C (Swamy, 1992).....	15
Figura 2.3 Relación entre la expansión de mortero de hormigón y el tamaño medio de las partículas de árido Zhang et al. (1999).....	17
Figura 2.4 Influencia del árido reactivo presente en las expansiones de hormigón. Efecto pésimo. (A) Expansión en %. (B) Contenido de árido reactivo, % de peso del árido total. Boletín 79, ICOLD (1991).....	18
Figura 2.5 Deformación tensional para diversos estados tensionales (Larive, 1998).....	19
Figura 2.6. Microfisura en un árido rellena de gel de RAS.Z2: gel, Z3: árido (Fernandes, 2009).....	20
Figura 2.7. Microfisura en la pasta de cemento rellena de gel de RAS (z4). (Fernandes, 2009).....	20
Figura 2.8 Estructura de hormigón afectada por RAS. Se aprecian macrofisuras por las que lixivia gel de RAS. Extraída de <i>Federal Institute for Materials Research and Testing-Germany</i> , 26/05/2016.....	21
Figura 2.9. Popout debido a RAS. Se aprecia gel de RAS blanco en el interior del desprendimiento. Tomado de Fournier et al. (2010).....	22
Figura 2.10. Cambio de las propiedades del hormigón en función de la tasa de expansión (Jones, A.E.K. & Clark, L.A., 1998).....	22
Figura 3.1 AAR –TM en el laboratorio de geotecnia.....	24
Figura 3.2. Probeta colocada en la AAR-TM.....	25
Figura 3.3 Bombas hidráulicas.....	25
Figura 3.4 Depósito con calentador conectado colocado en la parte superior de la AAR-TM.	27
Figura 3.5 Vista interior de platos de acero inoxidable AAR-TM.....	27
Figura 3.6 Vista superior de uno de los platos con calefactor.....	28
Figura 3.7 Esquema del LVDT (LabSen, 2014).....	29
Figura 3.8 Captura de pantalla del programa de control y adquisición de datos.....	30
Figura 3.9 Vista de los dos tipos de árido. Izquierda: Vidria sódico-cálcico. Derecha: árido calcáreo.....	33
Figura 3.10 Fotografía de la hormigonera durante el amasado.....	35
Figura 3.11 Fotografía tomada durante el proceso de llenado de los moldes.....	37
Figura 3.12 Probetas de hormigón durante el curado inicial en sus moldes.....	38
Figura 3.13 Fotografía tomada durante una medida con el extensómetro digital.....	39
Figura 3.14 Esquema de la ubicación de los terminales de medida.....	40
Figura 3.15 Probeta cúbica antes de ensayar. Con las esquinas cubiertas de silicona (izquierda); colocada entre platos y untando las juntas con silicona (derecha).....	41
Figura 3.16 Expansión libre de probetas de control respecto al tiempo. Promedio del valor de las tres direcciones. Se toma como estado de referencia la primera medida a 23°C.....	42
Figura 3.17 Expansión libre de probetas activas respecto al tiempo. Promedio del valor de las tres direcciones. Se toma como estado de referencia la primera medida a 23°C.....	43

Figura 3.18 Variación de peso con probetas de control respecto al tiempo. Se toma como estado de referencia la primera medida a 23°C.....	43
Figura 3.19 Gráfica variación de peso con probetas activas respecto al tiempo. Se toma como estado de referencia la primera medida a 23°C.....	44
Figura 3.20 Variación de peso vs deformación con probetas activas. Se toma como referencia la primera medida tomada en el periodo de exposición a 60°C.....	44
Figura 3.21 Detalle de exudación del gel y aparición de fisuras en TM-13 en una semana de exposición.....	45
Figura 3.22 Variación de temperatura en función del tiempo para probeta de control TM-03.....	45
Figura 3.23 Variación de tensiones en función del tiempo para probeta de control TM-03.....	46
Figura 3.24 Deformaciones en función del tiempo para probeta de control TM-03	46
Figura 3.25 Variación de temperatura en función del tiempo para probeta activa TM-02	47
Figura 3.26 Variación de tensiones en función del tiempo para probeta activa TM-02	47
Figura 3.27 Deformaciones en función del tiempo para probeta activa TM-02.....	47
Figura 3.28 Variación de temperatura en función del tiempo para probeta de control TM-08.....	48
Figura 3.29 Variación de tensiones en función del tiempo para probeta de control TM-08.....	49
Figura 3.30 Detalle de deformaciones en función del tiempo para probeta de control TM-08.....	49
Figura 3.31 Variación de temperatura en función del tiempo para probeta activa TM-11	50
Figura 3.32 Variación de tensiones en función del tiempo para probeta activa TM-11	50
Figura 3.33 Expansión en función del tiempo para probeta activa TM-11.....	51
Figura 3.34 Recopilación de las tres gráficas resultantes de los ensayos realizados con probetas activas.....	52
Figura 3.35 Deformación volumétrica de las probetas activas en función del estado tensional aplicado.....	53
Figura 4.1 Muestras de árido basáltico, fracciones de 6-20mm y 100mm	55
Figura 4.2 Porcentaje de variación de árido basáltico para diferentes contenidos de álcalis. M-3 Alto contenido de álcalis; M-4 Bajo contenido de álcalis. Batic et al. (1994).....	55
Figura 4.3 Fotografía tomada en laboratorio durante la elaboración de probetas cilíndricas con árido natural.....	58
Figura 4.4 Terminales metálicos (izquierda) y de moldes listos para su llenado (derecha)	59
Figura 4.5 Representación gráfica del proceso de llenado de moldes cilíndricos. Figura proporcionada por Liaudat, J.	59
Figura 4.6 Fotografía de cámara húmeda	60
Figura 4.7 Probetas en baño de solución alcalina dentro de recipiente	61
Figura 4.8 Aparatos utilizados para el registro de medidas. Izquierda: comparador analógico sobre marco de medición. Derecha: balanza electrónica.	62
Figura 4.9 Deformación versus tiempo durante la etapa de curado de la muestra 6-20mm.	65
Figura 4.10 Variación específica del peso durante etapa de curado muestra 6-20mm	65
Figura 4.11 Deformación versus tiempo durante la etapa de curado de la muestra 100mm	65

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Figura 4.12 Variación específica del peso durante etapa de curado muestra 100mm.....	66
Figura 4.13 Deformación versus tiempo durante la etapa de exposición de la muestra 6-20mm.....	67
Figura 4.14 Variación específica del peso durante etapa de exposición muestra 6-20mm.....	67
Figura 4.15 Deformación versus tiempo durante la etapa de exposición de la muestra 100mm.....	68
Figura 4.16 Variación específica del peso durante etapa de exposición muestra 100mm ..	68
Figura 4.17 Variación específica del peso muestra 6-20mm (ensayo completo)	69
Figura 4.18 Variación específica del peso de la muestra 100mm (ensayo completo)	69
Figura 4.19 Variación específica del peso primer muestra de referencia 6-20mm (ensayo completo). Fuente J. Liaudat.....	70
Figura 4.20 Deformación versus tiempo muestra 6-20mm (ensayo completo)	71
Figura 4.21 Deformación versus tiempo muestra 100mm (ensayo completo)	71
Figura 4.22 Deformación versus tiempo de primera muestra de referencia 6-20mm (ensayo completo). Fuente J. Liaudat.	72
Figura 4.23 Relación peso-deformación durante exposición muestra 6-20mm	73
Figura 4.24 Relación peso-deformación durante exposición muestra 100mm.....	73
Figura 4.25 Relación peso-deformación durante exposición de primera muestra de referencia 6-20mm (ensayo completo). Fuente J. Liaudat.	74
Figura 4.26 Capturas de probetas con árido basáltico	75

1. Introducción

1.1. Presentación

Las expansiones por Reacción Álcali-Sílice (RAS) constituyen el segundo mayor problema de durabilidad en estructuras de hormigón, sólo después de la corrosión de armaduras. Si bien este fenómeno ha sido estudiado por más de 70 años desde que fuera reportado por primera vez por Stanton (Stanton, 1940), todavía quedan aspectos que no han sido adecuadamente explicados.

La RAS tiene su origen en la combinación de algunas formas de sílice presentes en los áridos, con los iones álcalis (sodio y potasio) y calcio normalmente presentes en el agua de los poros del hormigón. Esta reacción da origen a un gel expansivo que va rellenando los poros más cercanos. Eventualmente, una vez agotado el volumen poros, la formación de gel generará presiones internas que darán origen a expansiones y fisuras en la estructura de hormigón. De esta manera, se van degradando las propiedades del material, comprometiendo por tanto sus condiciones de servicio y su durabilidad. En condiciones normales, las expansiones por RAS pueden tardar décadas en manifestarse, lo cual dificulta su estudio.

Desde el año 2010, el grupo de investigación MECMAT dirigido por el prof. I. Carol lleva adelante un proyecto de investigación sobre expansiones en hormigón debido a la RAS cuyo objetivo es dilucidar algunos aspectos problemáticos de las expansiones por RAS. Este proyecto se estructura en dos partes, por un lado un programa de ensayos experimentales y por el otro, un trabajo de teórico de propuesta, formulación e implementación numérica de un mecanismo de reacción que permita reproducir los aspectos más relevantes de este fenómeno. El Trabajo Final de Grado que aquí se presenta, se enmarca en el programa experimental de este proyecto de investigación. Se trata de una serie de ensayos de expansión libre y de expansión confinada desarrollados en el laboratorio de geotecnia del Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental (DECA) de la Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona, UPC, entre el 20 de enero y el 15 de junio de 2016.

1.2. Motivación y objetivo

La principal motivación de este trabajo es evaluar de qué manera influye el estado tensional del hormigón en el desarrollo de las expansiones por RAS en hormigón. Se trata de un aspecto poco estudiado de este fenómeno y que, sin embargo, puede ser de crucial importancia en estructuras en las que el hormigón se encuentra sometido a estados de compresión triaxial tales como presas o edificios de contención en centrales nucleares. En los últimos años, los investigadores C. Larive (Larive, 1998), S. Multon y F. Toutlemonde (Multon & Toutlemonde, 2006) han sugerido la existencia de una redistribución de las expansiones por RAS hacia las direcciones menos cargadas del material. Es decir, para distintos estados tensionales la expansión volumétrica inducida por la RAS se mantendría casi constante, pero la deformación sería mayor en las direcciones menos cargadas. Sin embargo, esta conjetura no ha sido probada de manera fehaciente.

Con el objetivo de probar o rechazar esta conjetura el programa experimental propuesto por MECMAT incluye la realización de una serie de ensayos de expansión por RAS en hormigón sometido a estados de compresión triaxiales y constantes, para lo cual se utiliza un equipo único en su tipo diseñado y fabricado ad hoc denominado AAR-TM. En el desarrollo de este Trabajo Final de Grado se ha participado en la preparación y ejecución de estos ensayos, así como en el análisis de los resultados obtenidos hasta el momento.

Además, se ha llevado a cabo también ensayos complementarios de expansión libre con probetas cilíndricas con el objetivo de caracterizar un árido reactivo natural que será utilizado en futuros ensayos con la AAR-TM.

1.3. Contenido

Este Trabajo Final de Grado está dividido en cuatro capítulos principales a partir de esta introducción. El cuerpo del trabajo comienza en el segundo capítulo, donde se explica el estado del arte relacionado con la RAS. Este capítulo introduce al lector explicando en que consiste la RAS, desde la química de la reacción hasta los efectos que causa en las propiedades mecánicas de las estructuras de hormigón, a partir de la revisión de la literatura existente.

El tercer capítulo se centra en los ensayos desarrollados en la AAR-TM. Se trata de ensayos de expansión confinada con probetas cúbicas e hormigón con diferentes tipos de árido. Se presenta de manera detallada la elaboración de las probetas, las características de la AAR-TM, la metodología de ensayo y los resultados obtenidos. Estos últimos se comparan con ensayos realizados anteriormente y se formulan conclusiones preliminares.

En el cuarto capítulo, se exponen los ensayos de expansión libre empleando probetas cilíndricas elaboradas con un árido natural basáltico. Se describen en detalle las características físicas y mineralógicas del árido ensayado, la elaboración de las probetas, la metodología experimental seguida y los resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones a las que se ha arribado y se señalan cuestiones a mejorar en las metodologías experimentales seguidas, así como posibles líneas futuras de investigación.

2. Reacción Álcali-Sílice (RAS)

2.1. Introducción

Uno de los aspectos trascendentales en la vida útil de las estructuras es la durabilidad del hormigón, es decir, su capacidad para soportar las condiciones físicas y químicas a las que está expuesto y que pueden provocar su degradación independientemente de su análisis estructural.

Entre los problemas más comunes de durabilidad del hormigón se encuentran las Reacciones Álcali-Árido (RAA). Estas reacciones tienen lugar cuando interaccionan

minerales silicatados presentes en los áridos (que son potencialmente reactivos) con los hidróxidos alcalinos del cemento. Como consecuencia, se forma un gel higroscópico que al absorber el agua aumenta su volumen. A partir de esta expansión del gel se crean microfisuras internas que causan grietas en el material deteriorándolo e incluso produciendo roturas de los elementos estructurales de hormigón.

Hasta ahora, se conocen tres tipos de reacciones de este tipo:

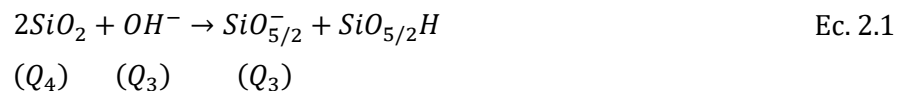
- Reacción Álcali-Carbonato (RAC)
- Reacción Álcali-Sílice (RAS)
- Ataque Álcali-Silicato

La más conocida y común de estas reacciones es la RAS y en la cual se va a basar nuestra investigación.

2.2. Descripción de la RAS

Se entiende por RAS al conjunto de reacciones químicas que tienen lugar cuando se produce la interacción de los hidróxidos alcalinos presentes en la solución de poros de la pasta cemento hidratada (PCH) con los minerales silicios de la superficie del árido. Se forma un gel resultante que tiene una gran afinidad con el agua y que como consecuencia se expande generando fisuras en el hormigón. Según recoge de forma explícita en Bulteel et al. (2002), la RAS es la suma de las siguientes dos reacciones:

- Formación de tetraedros Q_3 ¹, debido a una primera rotura de los enlaces siloxano² por ataque de iones hidroxilos:



Desde un punto de vista estructural, SiO_2 representa a tetraedros de sílice Q_4 compartiendo cuatro oxígenos con cuatro vecinos; $SiO_{5/2}^-$ representa tetraedros Q_3 cargados negativamente en una solución básica. En estas condiciones, los tetraedros Q_4 y Q_3 son elementos que continúan siendo constituyentes de los áridos.

La neutralización de las posiciones Q_3 responde al equilibrio:



En contacto con una solución alcalina, la forma preponderante es $SiO_{5/2}^-$. Las posiciones Q_3 cargadas negativamente se balancean mediante cationes K^+ , Na^+ y Ca^{2+} :

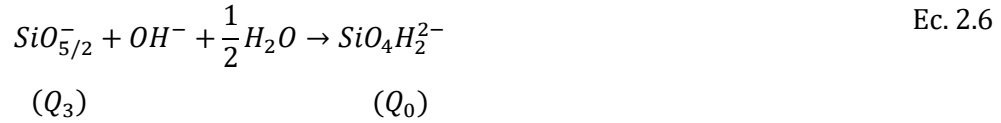


¹ Q_n significa que un tetraedro de Si está conectado a otros n tetraedros de Si , con n entre 0 y 4.

² Un siloxano es cualquier compuesto químico formado por unidades tipo R_2SiO , donde R es un átomo de hidrógeno o un grupo de hidrocarbóno.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

- Disolución de sílice debido a un ataque continuo de iones hidroxilos sobre los tetraedros Q_3 para formar iones silicato ($SiO_4H_2^{2-}$, $SiO_4H_3^-$) y pequeños polímeros:

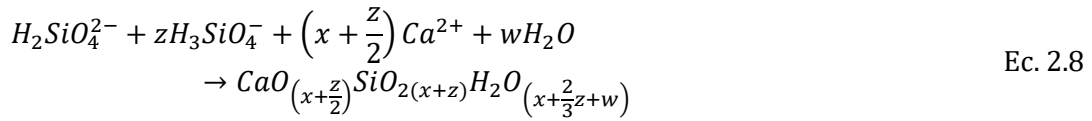


Estos iones silicato respetarán el equilibrio:

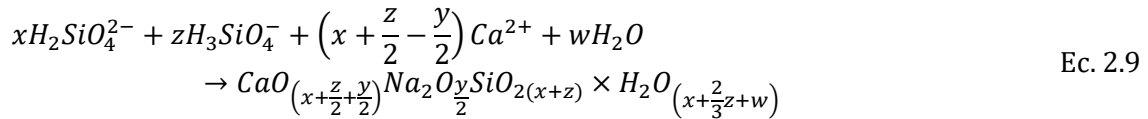


Posteriormente, los cationes de la solución de poros (Ca^{2+} , Na^+ , K^+) precipitarán los iones silicato llevando a la formación de CSH (silicato de calcio hidratado) y/o CNSH (silicato de calcio-sodio hidratado) y CKSH (silicato de potasio-sodio hidratado):

CSH:



CNSH³:



Así pues, cabe decir que para que la RAS tenga lugar, es imprescindible que tengamos sílice reactiva, álcalis y agua. Además de su presencia, para que la RAS produzca el deterioro del hormigón se necesita que las cantidades tanto de sílice reactiva y de álcalis sea significativa, y también que el agua de la reacción provenga de una fuente externa.

De esta manera podemos deducir que la RAS cesará cuando:

- El agua disponible se termina. El gel no aumentará más su volumen.
- La cantidad de álcalis disminuye hasta llegar a un valor que deja de ser significativo para la reacción.
- Se reduce la presencia de sílice reactiva. Se estabiliza la expansión.

Es importante tener presente que la presencia interna de gel no implica necesariamente que haya RAS destructiva. Algunos geles no se expanden o lo hacen de forma insignificante. Si un gel aumenta muy poco su volumen no causará problemas. Una expansión empieza a ser un inconveniente cuando crea presiones superiores a la resistencia a tracción del hormigón, teniendo como resultado fisuras internas. El ratio de migración del fluido interno de los poros hacia el lugar donde se encuentra la reacción también influye a las presiones de expansión del gel (Farny, J.A. & Kerkhoff, B., 2007).

³ La ecuación para el CKSH es análoga a la Ec. 2.9

2.3. Factores que afectan a la RAS

El efecto de la RAS en el hormigón depende de numerosos factores (Lindgård et al. 2012) entre los que se destacan:

- Humedad ambiental.
- Temperatura
- Contenido de álcalis del hormigón
- Contenido y tipo de sílice reactiva
- Contenido y granulometría del árido reactivo
- Estado tensional del hormigón

Humedad ambiental

Para que la RAS tenga lugar, es necesario tener una cantidad mínima de agua. El contenido de humedad es muy importante ya que el gel que se forma precisa de agua para expandirse.

En conclusión se considera que un valor de HR entorno al 80% es necesario para que la reacción expansiva tenga lugar aunque también se han visto casos de expansiones en ambientes secos debido a que la HR interna en el hormigón suele mantenerse bastante alta. Con la referencia de diferentes ensayos en Poyet et al. (2006) se ha interpretado que bajo el limbo de 60% de HR las expansiones obtenidas son prácticamente insignificantes, en cambio con valores superiores a 80% dichas expansiones se incrementan sustancialmente.

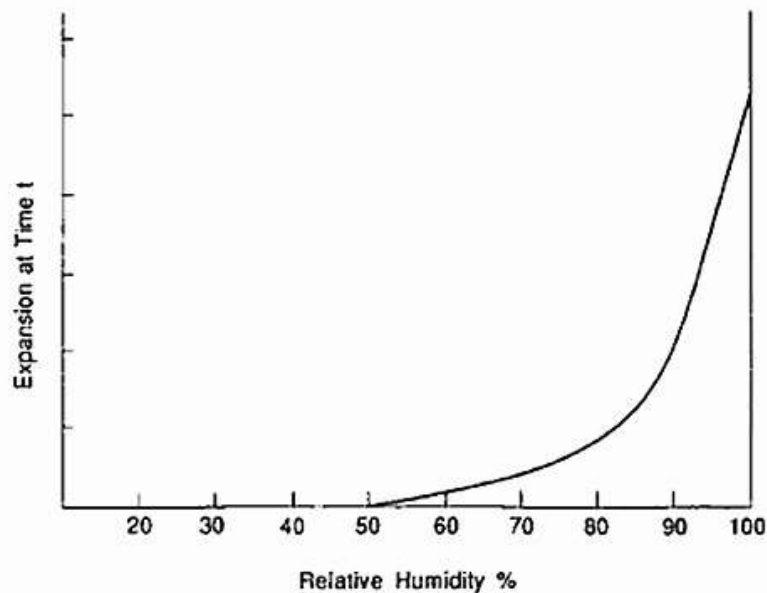


Figura 2.1 Efecto de la humedad relativa del hormigón en las expansiones por RAS (Swamy, 1992)

Temperatura

El efecto de la temperatura sobre la RAS está directamente relacionado con la humedad. Generalmente a temperaturas muy bajas la velocidad de reacción no es lo suficientemente alta para causar daños en la estructura. En cambio, a altas temperaturas la reacción será más rápida y, por tanto, se potenciará la creación de gel. Pero a la vez su viscosidad disminuirá; esto permite que dicho gel se introduzca mejor por los huecos y

fisuras disipando la presión por expansión, aminorando así el posible daño en la estructura.

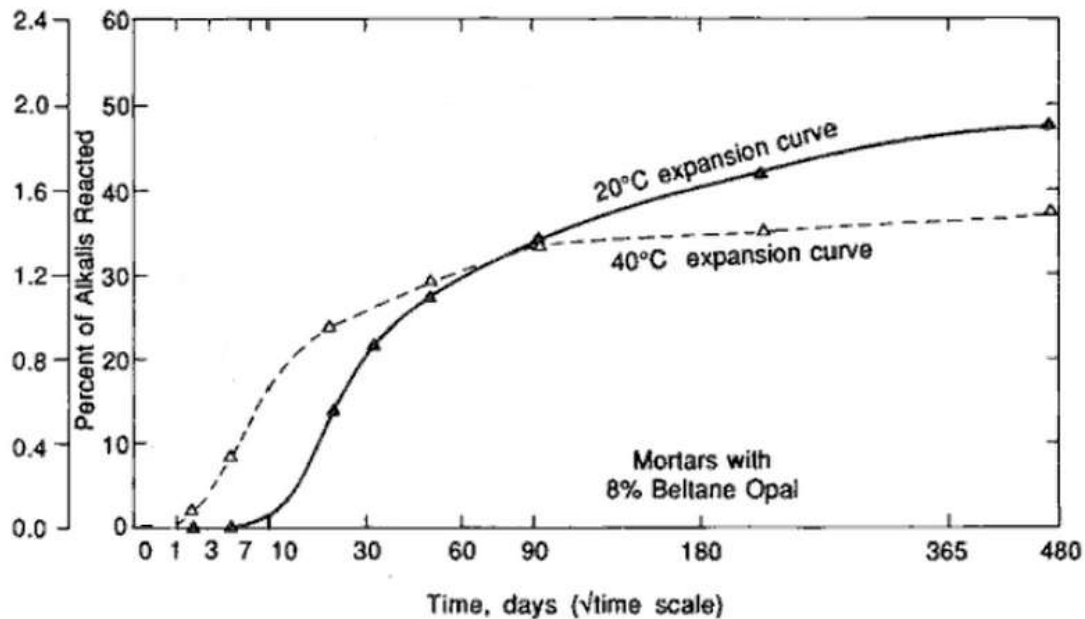


Figura 2.2 Comparación de parámetros de expansión con probetas a 20°C y 40°C (Swamy, 1992)

La mayoría de los ensayos para el estudio de los daños provocados por la RAS se llevan a cabo a temperatura constante para desestimar su efecto sobre las probetas.

Contenido de álcalis del hormigón

Por definición, los álcalis son sustancias como óxidos, hidróxidos y carbonatos de metales alcalinos que en solución acuosa aportan iones OH^- . El cemento Portland es un material artificial mezcla de productos (Clinker Portland) donde se originan principalmente los álcalis, sodio y potasio.

La cantidad de álcalis presentes se mide con un factor que es el *óxido de sodio equivalente* (Na_2O_{eq}). Para obtener la correlación entre los óxidos de sodio y potasio que intervienen, se utiliza la siguiente ecuación (Lindgård et al. 2012):

$$Na_2O_{eq} = \% \text{ peso } Na_2O + 0,685\% \text{ peso } K_2O \quad \text{Ec. 2.10}$$

Con distintos ensayos se muestra que los cementos portland con contenido superior a 0,6% Na_2O_{eq} provocan expansiones significativas cuando se utilizan áridos reactivos. Éste es el valor de referencia utilizado como punto de inflexión entre alto y bajo contenido de álcalis en el cemento.

A parte del cemento, los álcalis pueden venir también de un agente externo como es el agua de mar, agua subterránea, sales de deshielo o el agua utilizada en procesos industriales. Si tenemos un hormigón muy poroso o ya agrietado a causa de que la RAS ya está teniendo lugar en el interior a causa de los álcalis del cemento, será más fácil que estos álcalis externos se introduzcan en el hormigón acentuando aún más la expansión. Por eso, la normativa actual también tiene en cuenta no solo los álcalis que contiene el cemento. Por eso se utiliza $3Kg/m^3$ como valor tope de contenido de álcalis en hormigón para que haya RAS deletérea.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

En cualquier caso, sabemos que el incremento de álcalis presente en la reacción supone un aumento de la expansión y por tanto de las fisuras a las que da lugar a la RAS.

Contenido y tipo de sílice reactiva

Generalmente, la fuente de la sílice reactiva, SiO_2 , serán los áridos del hormigón. Pero hay que tener en cuenta que también pueden estar presentes en diferentes tipos de aditivos del hormigón.

Se apunta que la estructura interna de la sílice es determinante ya que define su solubilidad. Si la sílice es poco cristalina o una estructura amorfa, la reacción será más rápida. La velocidad de reacción aumenta contra más desordenada sea la estructura del mineral. Que un árido sea más o menos reactivo dependerá del tipo de sílice que contenga.

Los áridos según su mineralogía contarán con un aporte mayor o menor de esta sustancia. Seguidamente podemos ver una tabla con el tipo de rocas, minerales y otras sustancias sintéticas más reactivas.

Tabla 2.1 Rocas, minerales y sustancias sintéticas reactivas. Adaptada de Mehta & Monteiro (2006)

Substancia reactiva	Composición química	Características físicas
Ópalo	$SiO_2 \cdot nH_2O$	Amorfa
Calcedonia	SiO_2	Microcristalina o criptocristalina; generalmente fibrosa
Ciertas formas de cuarzo	SiO_2	Microcristalina a criptocristalina; Criptocristalina, pero intensamente fracturada, bajo tensión y/o llena de inclusiones
Cristobalita	SiO_2	Cristalina
Tridimita	SiO_2	Cristalina
Riolita, dacita, latita o andesita o productos de la desvitrificación criptocristalina	Silíceos, con proporciones menores de Al_2O_3 , FeO_{22} , tierras alcalinas y álcalis	Vítreo o materiales criptocristalinos como la matriz de las rocas volcánicas o los fragmentos de las tobas
Vidrios silíceos sintéticos	Silíceos, con proporciones menores de álcalis, alúmina, otras sustancias o todo lo anterior	Vítrea

Las rocas más perjudiciales en términos de la RAS (es decir, las rocas que contienen una o más de las sustancias listadas en la tabla) son las siguientes:

Sílex opalinos	Andesitas y tobas
Sílex calcedonios	Esquistos silíceos
Sílex cuarcíticos	Filitas
Calizas silíceas	Concreciones opalinas
Dolomitas silíceas	Cuarzos y cuarcitas fracturadas, bajo tensión o con inclusiones
Riolitas y tobas	
Dacitas y tobas	

Contenido y granulometría del árido reactivo

Se ha ido demostrando con numerosos ensayos, que si en el hormigón predomina un tamaño de árido muy fino, la superficie específica donde puede actuar la reacción es mayor. Es decir, si se tiene árido es fino, la velocidad de reacción será muy rápida pero, a la vez, se estabilizará más pronto. En cambio, con árido grueso, la velocidad de reacción será más lenta pero crecerá continuamente durante más tiempo, pudiendo llegar a un valor máximo superior (Mehta, P. K. & Monteiro, P. J., 2006).

Se ve en la siguiente figura una representación de la expansión del hormigón debida a la RAS en relación al tamaño de árido utilizado para diferentes tipos de probetas Zhang et al. (1999):

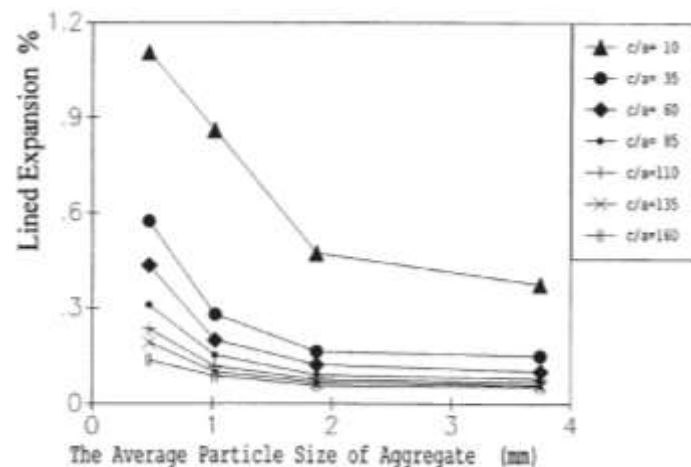


Figura 2.3 Relación entre la expansión de mortero de hormigón y el tamaño medio de las partículas de árido Zhang et al. (1999)

Efecto pésimo

Se llama efecto pésimo a la proporción de árido reactivo en el hormigón, que provoca un valor máximo en las expansiones debidas a RAS (Boletín 79, ICOLD, 1991).

En la Figura 2.1Figura 2.4 es el resultado de los valores de expansión en función de la proporción de árido reactivo. Para un valor determinado del contenido de árido reactivo en % del árido total, aparece un pico en las expansiones.

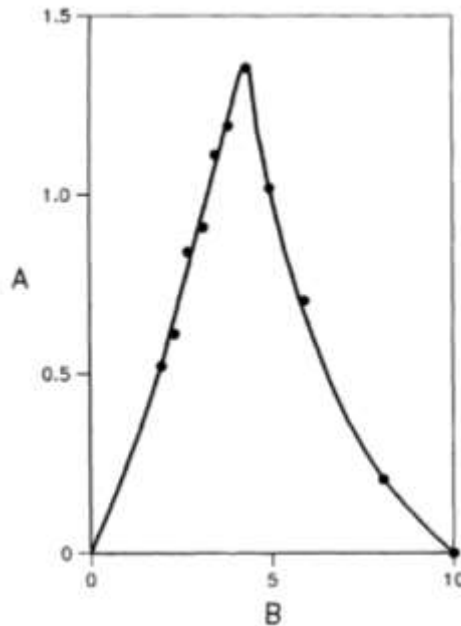


Figura 2.4 Influencia del árido reactivo presente en las expansiones de hormigón. Efecto pésimo. (A) Expansión en %. (B) Contenido de árido reactivo, % de peso del árido total. Boletín 79, ICOLD (1991)

El pico de la curva representa un punto de inflexión, antes de llegar a este valor, la tasa de expansión crece a medida que aumenta la proporción de árido reactivo. Esto es debido a que hay poca presencia de sílice reactiva en los áridos y se agota rápidamente al reaccionar con el resto de elementos, entonces el gel creado no será suficiente para provocar altos registros de expansión.

Una vez se supera el pico de expansiones, a medida que aumenta la proporción de árido reactivo disminuye la expansión del hormigón. Esto es causa de que para proporciones altas, gran parte de los iones alcalinos se han consumido durante el periodo de endurecimiento del hormigón, y por tanto, tampoco se formará suficiente gel para causar expansiones superiores al pico registrado.

La proporción pésima que forma este pico de expansiones tendrá un valor distinto dependiendo del tipo de árido reactivo utilizado: para un árido de alta reactividad como el ópalo, estará en torno al 3,5% y mostrará una curva con un pico más agudo; para un árido menos reactivo, el valor se encontrará entorno al 15% y presentará curvas más planas.

Estado tensional del hormigón

Dependiendo del estado tensional al que se somete una probeta, la expansión producida por RAS será distinta. En la literatura encontramos que se han realizado numerosos ensayos, aplicando distintos valores de carga en las probetas se observa que las expansiones producidas por RAS se reducen en las direcciones en las que trabaja esta carga compresiva.

En su tesis doctoral (1998), C. Larive realiza ensayos aplicando distintos valores de carga en la dirección longitudinal de probetas cilíndricas. Como se observa en la Figura 2.5, en los ensayos de expansión libre las probetas registran expansiones del orden del 0,2%; a medida que se aplica una carga longitudinal mayor, la tasa de expansión se va reduciendo. Este efecto es debido a que a medida que se aumenta la carga longitudinal, las deformaciones se reparten en las otras direcciones (no cargadas).

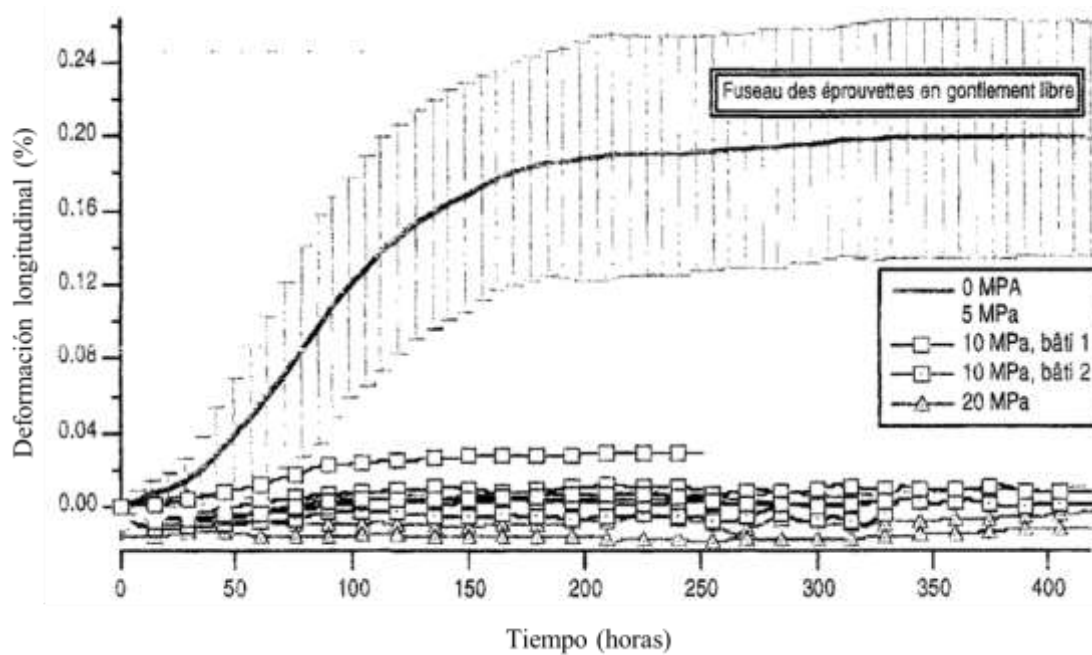


Figura 2.5 Deformación tensional para diversos estados tensionales (Larive, 1998)

Multon y Toutlemonde (2006) continuaron estudiando las expansiones en el hormigón para diversos estados tensionales. En sus experimentos, también con probetas cilíndricas, además de distintos niveles de carga longitudinal, establecieron distintos niveles de confinamiento lateral pasivo mediante anillos de acero de distintos espesores. A partir de sus resultados experimentales, ellos formularon la hipótesis de que las direcciones más cargadas transfieren las deformaciones hacia las direcciones menos cargadas, concluyendo que la deformación volumétrica (suma de las tres dimensiones) se mantiene aproximadamente constante.

2.4. Efectos de la RAS en el hormigón

Como consecuencia de la RAS se pueden producir microfisuras internas, exudación del gel, expansiones, popouts (explicados más adelante) y grietas, que generalmente conducen una degradación de las propiedades mecánicas del hormigón afectando así al comportamiento de éste dentro de las estructuras.

En muchas ocasiones estas manifestaciones permiten identificar a simple vista estructuras están siendo afectadas por la RAS. En otras, sin embargo, los efectos de la RAS pueden confundirse con otros problemas de durabilidad o prácticamente no manifestarse al exterior del hormigón. Una gran variedad de construcciones como presas, muros, puentes y firmes se ven comprometidos por estos efectos de la RAS.

Microfisuración del hormigón

La RAS puede desarrollarse en primer lugar en la superficie del árido en contacto con la pasta de cemento o, incluso, iniciarse dentro de un árido y propagarse la grieta hacia fuera. A causa de la expansión y dilatación del gel formado se crean presiones internas provocando microfisuras en la interfase árido-pasta.

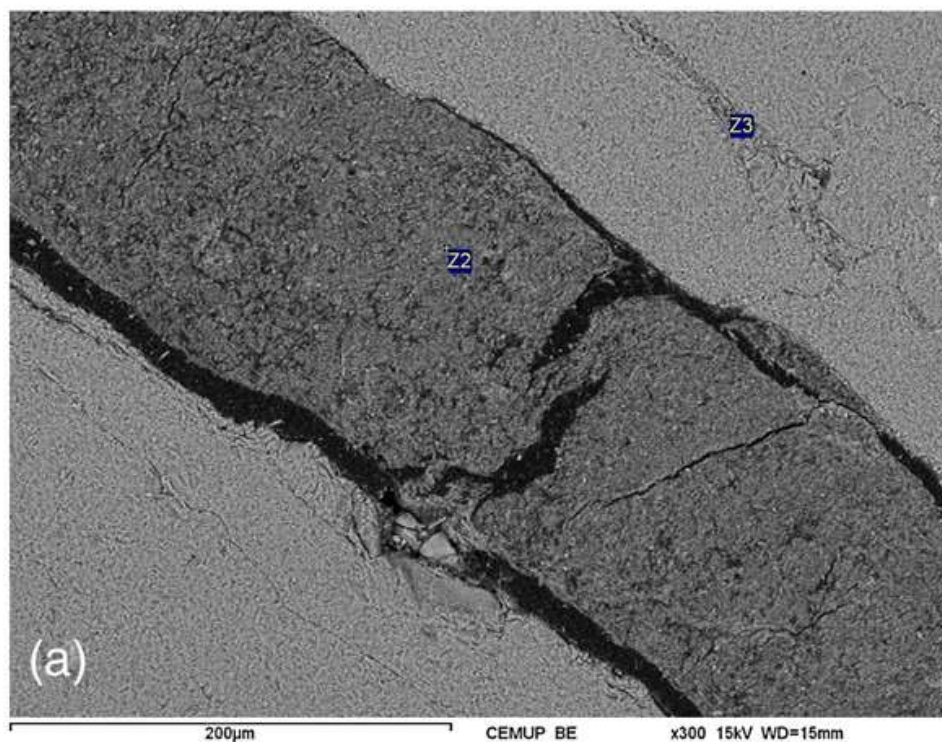


Figura 2.6. Microfisura en un árido rellena de gel de RAS.Z2: gel, Z3: árido (Fernandes, 2009)

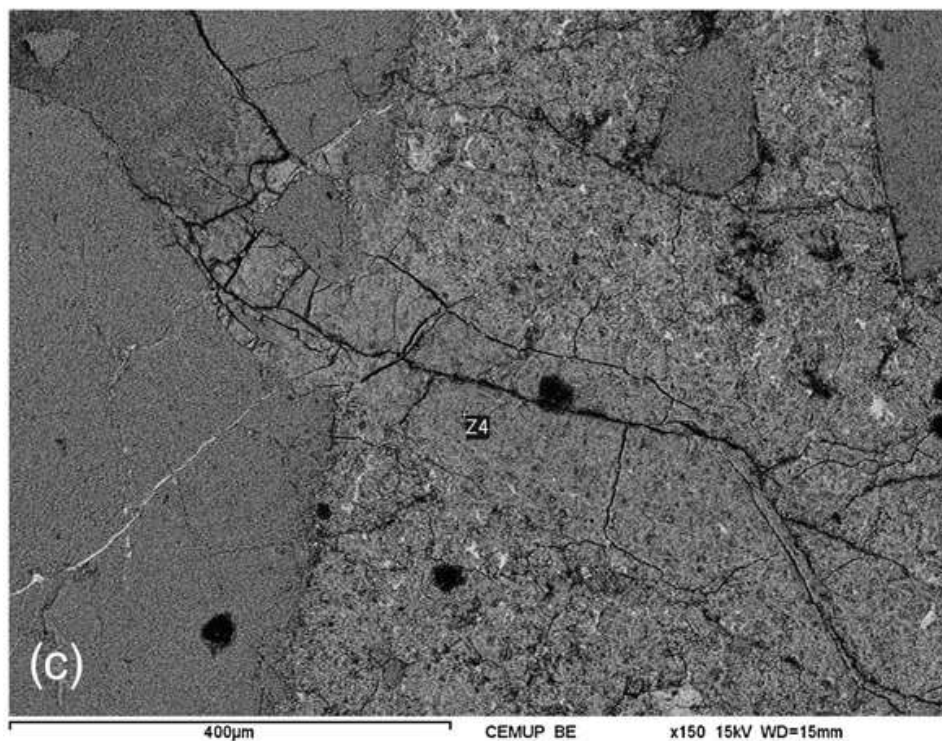


Figura 2.7. Microfisura en la pasta de cemento rellena de gel de RAS (z4). (Fernandes, 2009)

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Las Figura 2.6 y Figura 2.7 son imágenes de unas muestras visualizada con microscopio electrónico por (Fernandes, 2009). Se puede apreciar en las imágenes tomadas que el gel se va acomodando en la interfase árido-pasta y a causa de las presiones se forman también roturas en el interior del árido. Observamos también algunas microfisuras que se abren camino a través de la pasta de cemento.

Macrofisuración del hormigón

Después de las primeras fisuras internas, la RAS sigue su proceso y el gel sigue expandiéndose. De esta manera, se van formando grietas cada vez más grandes que llegan hasta la superficie de la estructura.

El gel se va abriendo camino por el lugar más débil que encuentra, es decir, las grietas. En estos casos, se aprecia como aparecen algunas exudaciones del gel en la superficie que toma un color blanquecino o grisáceo.



Figura 2.8 Estructura de hormigón afectada por RAS. Se aprecian macrofisuras por las que lixivia gel de RAS. Extraída de *Federal Institute for Materials Research and Testing-Germany*, 26/05/2016

En la Figura 2.8, se ve una estructura que ha sufrido RAS donde las roturas ya son significativas y han dejado paso al gel interno hacia la superficie. Las propiedades de servicio se encuentran claramente comprometidas.

Popouts

El anglicismo popout hace referencia a los desprendimientos puntuales en la superficie del hormigón a causa de la RAS. La presencia de popouts es un claro indicador de que la

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

estructura está siendo dañada por la reacción. En la Figura 2.9 se puede ver un popout de aproximadamente 5 cm de diámetro.

Este tipo de desprendimientos no tienen por qué ser estrictamente negativos. En algunos casos la presencia de popouts no tiene ningún efecto sobre la durabilidad del hormigón. Una acción correctiva podría ser cubrir los huecos de los popouts con pasta de cemento para intentar reparar los daños.



Figura 2.9. Popout debido a RAS. Se aprecia gel de RAS blanco en el interior del desprendimiento. Tomado de Fournier et al. (2010)

Degradación en las propiedades del hormigón

Como ya sabemos, el gel formado en la RAS se expande provocando presiones internas en el hormigón. En consecuencia se fisura el hormigón teniendo como resultado principal una disminución en la resistencia y un aumento de la permeabilidad.

Por consiguiente, el hormigón agrietado es más susceptible a sufrir daños en caso de factores externos agresivos: ciclos de hielo/deshielo, corrosión de la armadura o ataque de sulfatos. El resultado global es que la integridad de la estructura puede verse comprometida y la vida útil de servicio se reduzca.

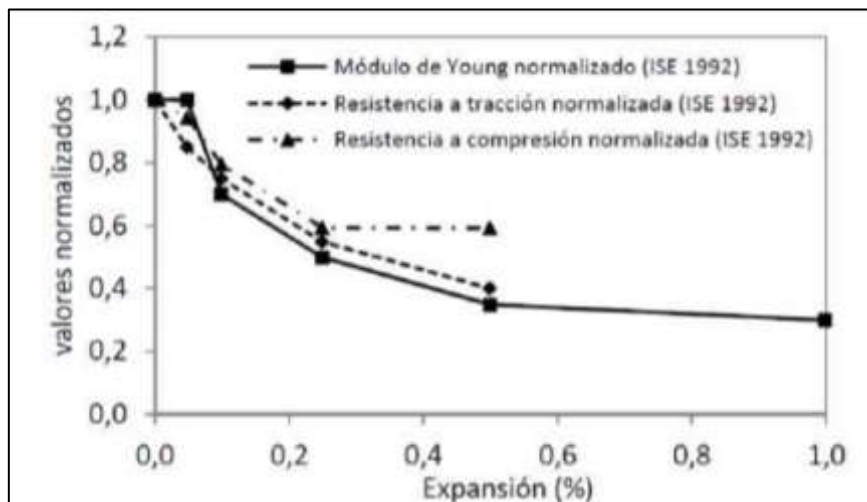


Figura 2.10. Cambio de las propiedades del hormigón en función de la tasa de expansión (Jones, A.E.K. & Clark, L.A., 1998).

En la Figura 2.10 queda reflejado que el valor del módulo de Young para un hormigón sometido a RAS disminuye a medida que la expansión por RAS va creciendo. Lo mismo

ocurre con los parámetros de resistencia a tracción y compresión que se reducen significativamente a medida que la expansión aumenta. Se ha dejado constancia de la clara degradación del hormigón que puede causar graves problemas estructurales en cualquier tipo de construcción (Jones, A.E.K. & Clark, L.A., 1998).

3. Ensayos de expansión confinada con probetas de vidrio triturado

3.1. Introducción

En este capítulo se explica una de las partes experimentales del trabajo: la preparación, ejecución e interpretación de los ensayos de expansión confinada.

Los siguientes experimentos se han llevado a cabo en el laboratorio de geotecnia del Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental (DECA) de la Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Se pretende estudiar la expansión que sufren diferentes probetas de hormigón sometidos al efecto de la RAS. La particularidad de este tipo de experimentos es aplicar un determinado estado tensional (Apartado 2.3) a las probetas en estado confinado, haciendo circular una solución alcalina y manteniendo una temperatura experimental de 60°C. De manera resumida, el sistema de los ensayos consiste en elaborar probetas cúbicas de 150 mm de lado y lo novedoso respecto experimentos anteriores es aplicar tensiones distintas en cada uno de sus direcciones X-Y-Z, para observar cuál será su expansión.

Todo ello se lleva a cabo mediante un equipo experimental llamado AAR-Triaxial Machine adquirido por el grupo de investigación MECMAT como explicamos en el apartado siguiente. Más tarde se define también la metodología de los ensayos: desde la elaboración de probetas hasta la puesta a punto y control de la máquina. Por último se muestra la discusión de todos los resultados.

3.2. Descripción del equipo

Para llevar a cabo estos experimentos de expansión confinada utilizamos un equipo de ensayo que nos permitirá estudiar el comportamiento de las probetas de hormigón afectadas por la RAS. Esta máquina fue diseñada en la Universidad de Colorado-Boulder de Estados Unidos por el Prof. V. Saouma en el año 2007. Más tarde, en el año 2010 fue adquirida por el grupo de investigación MECMAT y traída al laboratorio de Geotecnia del DECA.

La AAR-TM ha ido evolucionando de su diseño original a partir de la prueba y error de los ensayos llevados a cabo hasta el día de hoy. No fue hasta el 2012 cuando fue puesta en marcha por primera vez después de su pertinente calibración (Figura 3.1).



Figura 3.1 AAR -TM en el laboratorio de geotecnia.

Para su descripción, el equipo puede considerarse como compuesto por cinco subsistemas que trabajan de forma conjunta: (1) subsistema de carga, (2) Subsistema de circulación de líquidos, (3) subsistema de temperatura, (4) subsistema de medición de deformaciones y (5) subsistema de control y adquisición de datos. En los siguientes apartados se describen por separado cada uno de estos subsistemas de manera detallada.

1) Subsistema de carga

El funcionamiento de la máquina se basa en someter un estado tensional sobre una probeta cúbica, pudiendo aplicar cargas distintas en cualquiera de las tres direcciones X-Y-Z, en función del tipo de ensayo. La AAR-TM está preparada para funcionar a un mínimo de 1MPa y hasta el máximo posible de 9 MPa.

En conjunto, hay seis cilindros de acero mediante los cuales se aplica la carga, tres son activos (vinculados a actuadores hidráulicos) y tres pasivos (directamente al marco de cargas), es decir se cuenta con dos cilindros de acero por dirección (uno activo y el otro pasivo). Se puede ver en la Figura 3.2.

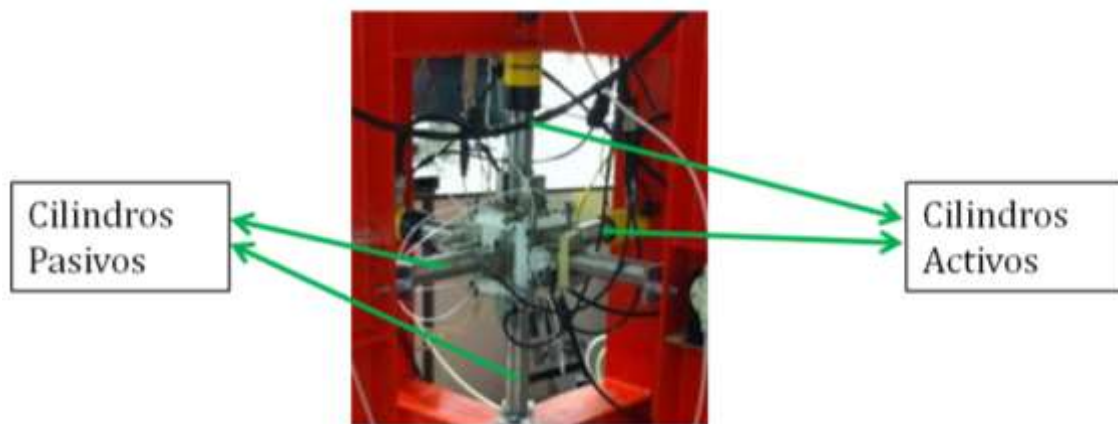


Figura 3.2. Probeta colocada en la AAR-TM

La presión hidráulica de los actuadores es suministrada por un sistema formado por tres bombas hidráulicas (Figura 3.3), cada una conectada a una dirección de carga diferente X-Y-Z. Estas bombas de alta presión (700 bar máx.) son accionadas por una fuente de aire comprimido de baja presión (7 bar) situada en el mismo laboratorio controlada por electroválvulas accionadas con el ordenador (5) Subsistema de control y adquisición de datos)

Todo este sistema hidráulico es controlado por:

- Un manómetro analógico que controla la presión en cada dirección de carga.
- Una válvula de alivio de presión para cada dirección de carga.
- Un transductor de presión que enlaza el sistema de carga con el ordenador (explicado más adelante en el apartado 5) Subsistema de control y adquisición de datos)

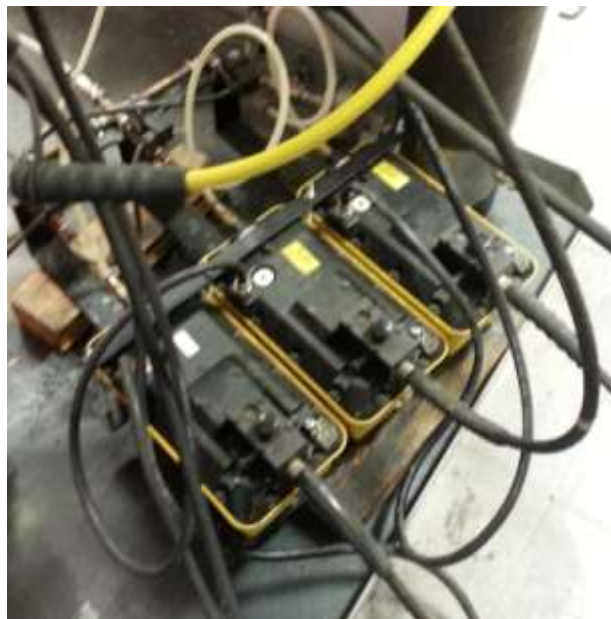


Figura 3.3 Bombas hidráulicas

Gracias a estos dispositivos de regulación podemos ajustar más estrictamente la carga de confinamiento empleada.

Como se ha comentado, la presión aplicada por cada bomba puede ser independiente en cada dirección; pero también es posible enlazar dos, o los circuitos hidráulicos para conseguir que la carga aplicada sea la misma en las direcciones conectadas.

Los cilindros de carga no están en contacto directo con las probetas, sino que se usan unos platos de acero inoxidable para distribuir la presión aplicada en cada cara de la probeta. Estos platos están articulados, permitiendo una excentricidad respecto a la dirección del cilindro al que van ajustados.

2) Subsistema de circulación de líquidos

Para los ensayos se utiliza una solución 1M *NaOH*. Se trata de una solución alcalina que tiene como objetivo mantener la probeta saturada de agua, y aportar un porcentaje muy elevado de álcalis, asegurando que no se vayan a consumir por completo durante el ensayo.

El pH de este tipo de soluciones es muy alto, por tanto, se trata de un líquido muy corrosivo. Por eso, se deben utilizar materiales con una alta resistencia a la corrosión tales como acero inoxidable.

El caudal de la solución será conducido mediante un circuito cerrado durante todo el ensayo. Se trata de un circuito en serie que pasa de un plato al otro para poder garantizar que el caudal sea el mismo en todos los platos. Éste es un factor muy importante, ya que si el circuito fuera en paralelo, acabaríamos teniendo algún plato con un caudal mayor y, por tanto, este plato se refrigeraría más bajando mucho su temperatura respecto al resto de platos. Con el circuito en serie, aseguramos que la temperatura media de los platos permanecerá prácticamente constante.

Se coloca un depósito de unos 20 L con la solución en la parte superior de la AAR-TM (Figura 3.4). Este depósito tiene un calentador y un termostato que permite mantener la solución a la temperatura de ensayo (60°C). El depósito se coloca en la parte superior de la máquina para que tenga la presión suficiente para que circule un caudal adecuado aprovechando la diferencia de altura.



Figura 3.4 Depósito con calentador conectado colocado en la parte superior de la AAR-TM.

La solución sale por unos tubos de un diámetro de 10 mm y se dirige hacia la probeta. Durante los ensayos la probeta se encuentra confinada. La conexión entre los cilindros, que aplican la carga en las tres direcciones, y la probeta cúbica son los platos de acero inoxidable que aguantan el cubo de hormigón (6 platos en total). Ver Figura 3.5.

Los platos estarán en contacto directo con la probeta y colocaremos una junta tórica de goma (O-ring). Dicha junta es de VITON, un polímero de alta resistencia química que nos ayuda a reducir las posibilidades de escapes de fluido. Además, una vez instalados los platos correctamente, sellaremos las aristas de la probeta con silicona para impedir que haya ninguna fuga de la solución que circulará durante el ensayo.

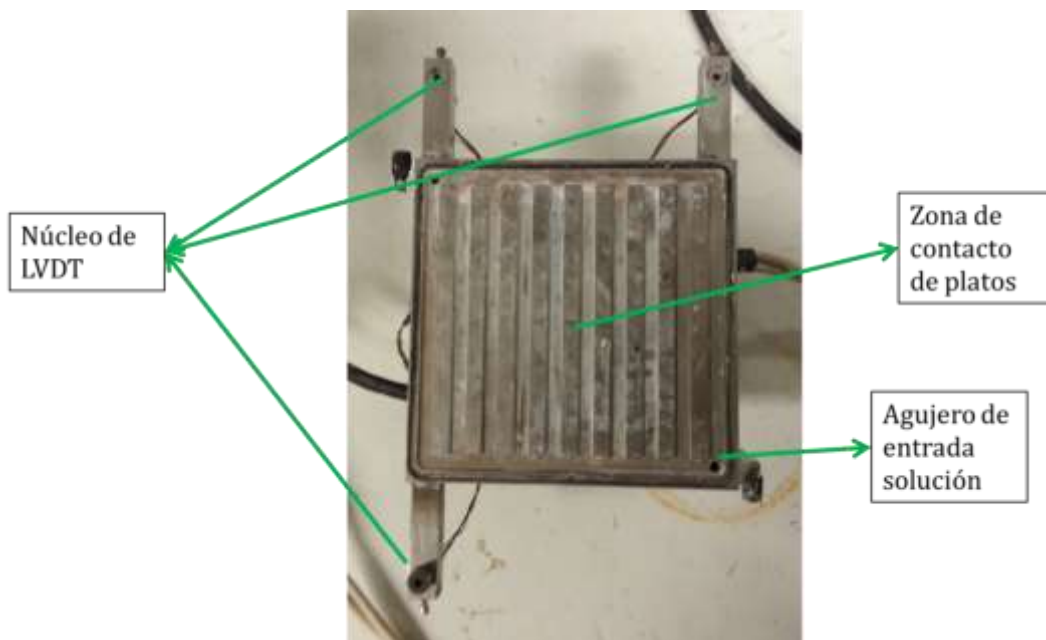


Figura 3.5 Vista interior de platos de acero inoxidable AAR-TM

Estos platos disponen de dos agujeros. La solución es conducida del depósito inicial a través de uno de los tubos hasta el primer plato, se introduce por el agujero de entrada empapando la probeta y se escapa por el agujero de salida por otro tubo en dirección al siguiente plato.

De la misma manera, la solución es conducida por cada uno de los seis platos hasta que finalmente llega a un segundo depósito colocado en la parte inferior de la máquina. Como el volumen de solución será constante durante todo el ensayo (aprox. 20L), habrá instalada una bomba que devuelve la solución del depósito inferior al depósito superior de manera que se cierre el circuito. Esta bomba se activa cuando el depósito inferior llega a un nivel máximo determinado por unos flotantes. El depósito superior también cuenta con unos flotantes que controlan el accionamiento del calentador para evitar que éste se dañe si el nivel de solución se encuentra al mínimo.

3) Subsistema de control de temperatura

El ensayo se lleva a cabo a una temperatura aproximada de 60 °C con el objetivo de acelerar la RAS en la probeta de hormigón. Como se ha detallado anteriormente, la solución se calienta a esa temperatura en el depósito superior mediante un calentador eléctrico. A medida que el líquido va avanzando por el circuito, su temperatura disminuye. Para mantener la temperatura media de la probeta, se acopla un dispositivo calefactor a cada plato (Figura 3.6) que permite calentar las probetas hasta los 70°C. Los calefactores están cubiertos con una capa de silicona para aislarlos de cualquier fuga de líquido que pudiera ocurrir. A su vez, los tres platos activos disponen de un sensor de temperatura de precisión que envía los registros al ordenador y que permite controlar el encendido/apagado de los calentadores.

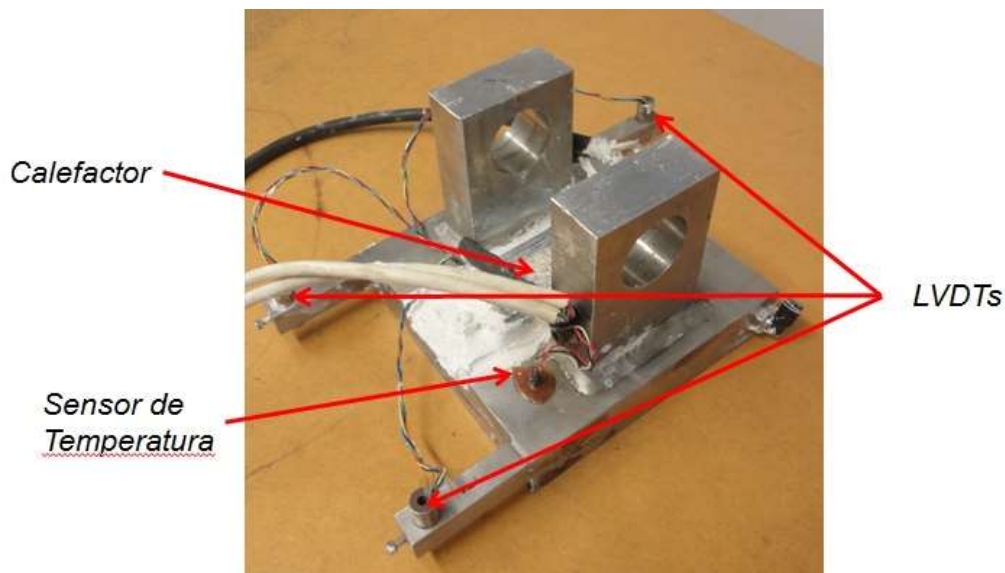


Figura 3.6 Vista superior de uno de los platos con calefactor.

4) Subsistema de medición de deformaciones

Como se ha descrito anteriormente, la probeta está confinada entre seis platos metálicos distribuidos de la siguiente manera: un plato pasivo y un plato activo por dirección de carga. A cada par de platos se conectan tres sensores de desplazamiento conocidos como Transformadores Diferenciales Linealmente Variables (LVDT, por sus siglas en inglés).

Un LVDT funciona de manera muy similar a la de un transformador (Figura 3.7): un sistema de bobinado crea un campo magnético a partir de la corriente eléctrica; un núcleo magnético (ensamblado a la varilla) se desplaza por en medio de este campo y se envía una señal a medida que varía la amplitud del voltaje. Esta señal se envía y es registrada por el ordenador.

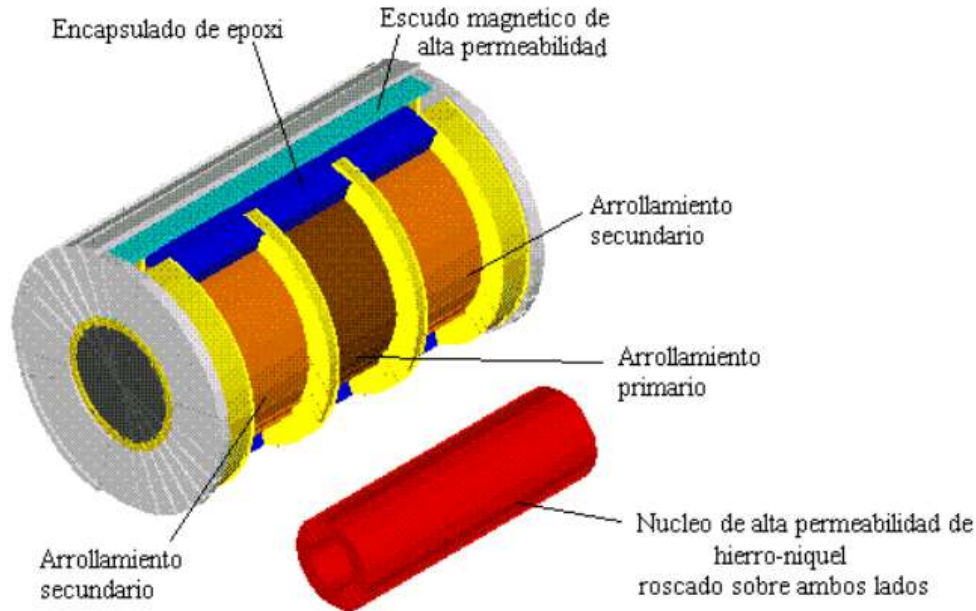


Figura 3.7 Esquema del LVDT (LabSen, 2014)

El núcleo del LVDT está unido a unas varillas que van enroscadas al plato pasivo y el detector del LVDT está situado en el plato activo. Se registra así su desplazamiento relativo. Se colocan tres LVDT por dirección debido a que con tres puntos de referencia es suficiente para definir un plano: el objetivo es medir el desplazamiento que tiene el punto central de cada cara, para eso serían necesarios dos puntos de referencia, además se añade un tercer punto para conocer si existe una rotación relativa de las caras. Es decir, que en total dispondremos de 9 LVDT para los experimentos (Figura 3.6).

5) Subsistema de control y adquisición de datos

Todo este sistema es controlado por un programa informático escrito en LabView (Figura 3.8). Este software nos permite determinar las variables de entrada para desarrollar el experimento:

- Carga aplicada en cada dirección X-Y-Z
- Temperatura de los calentadores

De manera resumida, cuando se determina los valores de carga que definen el confinamiento, el sistema hidráulico es accionado y la bomba suministra pulsos de presión hasta que la carga se va acercando al valor especificado en el programa. Cuando los valores registrados, son inferiores al valor introducido, el sistema hidráulico se vuelve a poner en marcha. Además se pueden activar o desactivar las bombas que suministran la presión al sistema

De manera similar se controla la temperatura. La potencia de los calefactores de los platos aumenta hasta que la temperatura se va acercando a la determinada, antes de llegar, la potencia se va reduciendo de manera que la temperatura media de la probeta se

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Alkali-Sílice en hormigón

mantenga estable a 60°C. Cuando el valor medio, es inferior al valor introducido, los calefactores se vuelven a accionar.

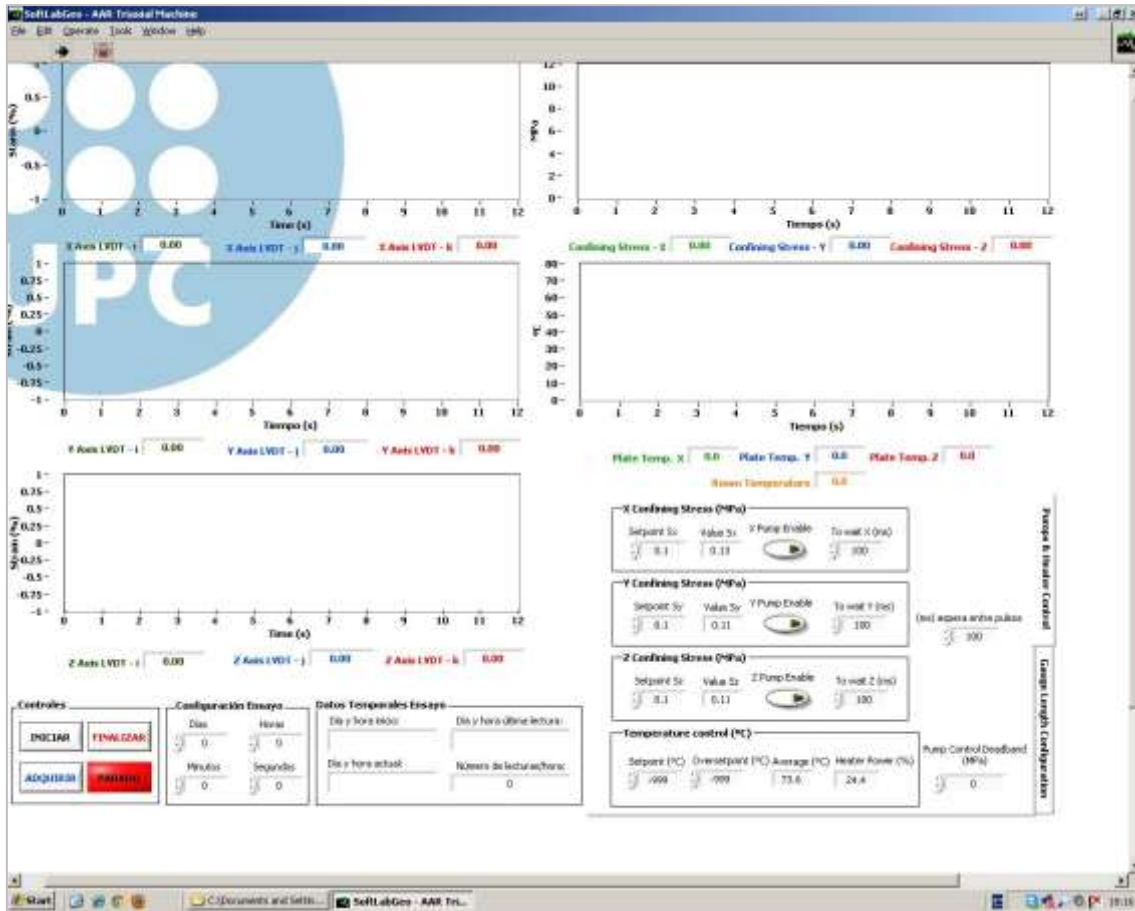


Figura 3.8 Captura de pantalla del programa de control y adquisición de datos.

Además el programa también lleva a cabo la adquisición de datos. Se le introduce un intervalo de tiempo en el que registra los datos y se encarga de medir la temperatura de los platos, la presión aplicada, la temperatura ambiente del laboratorio y la deformación entre platos (LVDT).

Se creó una primera versión de este programa en la Universidad de Colorado. Una vez llegó la máquina a la UPC, se realizaron modificaciones para optimizar el funcionamiento del programa.

Se requirió un amplio esfuerzo para calibrar los diferentes elementos de medición. Este trabajo formó parte de un proyecto final de grado anterior al nuestro (Acosta Collell, 2012).

Con el objetivo de medir lo que está ocurriendo en el ensayo, se ha utilizado otro dispositivo a parte de LabView adquirido de *National Instruments*⁴, la tarjeta de adquisición de datos.

Características técnicas del equipo:

⁴ Empresa online de suministro de software y dispositivos para ensayos científicos, ingeniería, etc. (<http://www.ni.com/es-es.html>)

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Tabla 3.1 Características y especificaciones técnicas de la AAR-Triaxial Machine

Especificaciones eléctricas	
Voltaje	110-240 VAC monofásica
Corriente	Máx. 10 A
Frecuencia	50-60 Hz
Especificaciones neumáticas	
Presión de aire	700 kPa
Consumo	Máx. 300 litros/min
Especificaciones hidráulicas	
Presión del sistema	Máx. 70 MPa
Fuerza aplicada del actuador	Máx 220 kN
Recorrido del actuador	Máx. 25,4 mm
Número de actuadores	3
Control de carga	
Tipo de control	Bucle cerrado
Sensor de presión de aceite	Omega PX02S1-10KG5T
Rango del sensor	0-70 MPa
Control de entrada	Electroválvula neumática
Control de temperatura	
Tipo de control	Bucle cerrado
Sensor	National Semi LM-34
Error de lectura	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Rango de actuación	30-70 $^{\circ}\text{C}$
Tipo de calentador	Resistencia eléctrica (strip heater)
Potencia calentadores	200 W (cada uno)
Tipo de control del calentador	Linear Proportional PWM
Control de expansión	
Tipo de sensor	Macro Sensors CD-375 LVDT
Número de sensores	9
Acondicionamiento de la señal	Externa
Rango del sensor	$\pm 2,54$ mm
Linealidad del sensor	$\pm 0,5\%$

3.3. Elaboración de probetas

Una parte importante de este trabajo ha sido la elaboración de probetas cubicas. En total se hicieron 10 probetas de hormigón de las cuales 5 fueron elaboradas solamente con árido calcáreo y, las otras 5 restantes, fueron elaboradas con árido de vidrio triturado.

Aproximadamente para la elaboración de estas probetas se han invertido unas 60 horas, contando toda la preparación previa de los materiales (cemento, áridos, moldes, etc.), la elaboración y el postproceso (desmolde, etc.)

Hay que decir, que estas probetas necesitan un tiempo de curado de unos cuantos meses (generalmente más de tres meses), por tanto, no son las mismas que han sido utilizadas en los ensayos de expansión libre ni expansión confinada definidos más adelante (Capítulo 3.4).

Probetas

El objetivo es estudiar el comportamiento del hormigón bajo el efecto de diferentes estados tensionales. De esta manera, se han realizado los ensayos con dos tipos distintos de probetas (Figura 3.9):

- Probetas de control: con árido natural no reactivo (árido calcáreo).
- Probetas activas: con árido natural y árido de vidrio sódico-cálcico.

Las probetas de control nos servirán para comparar los resultados obtenidos con las demás probetas activas y examinar el efecto real de la RAS debido al árido reactivo.

El vidrio sódico cálcico no es otra cosa que vidrio reciclado, de botellas, ventanas, etc. Para la primera campaña experimental con la AAR-TM, se ha elegido vidrio en lugar de árido reactivo de origen natural por las siguientes ventajas:

a) el vidrio sódico-calcio es muy reactivo por lo que se tienen expansiones importantes en poco tiempo de ensayo.

b) todo el volumen de vidrio puede considerarse reactivo, por lo que no es necesario investigar la situación de la sílice reactiva que contiene el árido.

c) tratarse de un árido de origen industrial su composición es constante y homogénea, y, además, podemos disponer de las cantidades necesarias sin restricciones.

Una vez que la metodología de ensayo haya sido validada se pasará a realizar ensayos con áridos reactivos naturales.



Figura 3.9 Vista de los dos tipos de árido. Izquierda: Vidria sódico-cálcico. Derecha: árido calcáreo

Dosificación

Para la dosificación de las probetas se tomó como referencia los parámetros indicados en la norma ASTM C1293:

Tabla 3.2 Valores de dosificación de las probetas

DOSIFICACIÓN DE LAS PROBETAS	
Relación agua cemento	$w/c = 0,45$
Contenido unitario de cemento	$CUC = 420 \text{ kg/m}^3$
Contenido total de álcalis	$[Na_2O_{eq}] = 1,25\%$ del peso del cemento
Contenido árido grueso	70% densidad seca aparente del árido grueso
Contenido árido fino	30% densidad aparente del árido grueso

La densidad seca aparente del árido grueso calcáreo se obtiene en laboratorio y tiene un valor de $1568,79 \text{ kg/m}^3$. En el caso del árido de vidrio molido, el valor es de 1467 kg/m^3 .

Para completar el contenido de álcalis necesarios, en caso de que la aportación de cemento no llegue al valor establecido, añadiremos $NaOH$ (Hidróxido de sodio – comúnmente sosa caustica) al agua de mezclado.

Granulometría

En las tablas siguientes se muestran las granulometrías utilizadas en cada tipo de probetas:

Tabla 3.3 Granulometría de las probetas de control

PROBETAS DE CONTROL			
Fracción Gruesa			
Tipo de árido	Pasa (mm)	Retenido (mm)	Peso (%)
Calcáreo	12,70	9,52	50,0
	9,52	4,55	50,0
Fracción Fina			
Calcáreo	4,55	2,50	12,0
	2,50	1,18	41,9

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

	1,18	0,52	24,3
	0,52	0,30	9,9
	0,30	0,15	8,0
	0,15		4,0

Tabla 3.4 Granulometría de las probetas activas

PROBETAS ACTIVAS			
Fracción Gruesa			
Tipo de árido	Pasa (mm)	Retenido (mm)	Peso (%)
Vidrio	12,50	9,50	50,0
	9,50	4,75	50,0
Fracción Fina			
Vidrio	4,55	2,50	10,0
Calcáreo	4,55	2,50	10,8
	2,50	1,18	37,7
	1,18	0,52	21,9
	0,52	0,30	8,9
	0,30	0,15	7,2
	0,15		3,6

Cemento

Para la elaboración de probetas se utiliza cemento gris Tipo I 42.5R definido según norma UNE-EN 197:1.

Con el objetivo de conocer la cantidad de álcalis que contiene este tipo de cemento, se analizaron mediante fluorescencia de rayos X (FRX) dos muestras del mismo en los laboratorios de CCiT-UB. La composición promedio obtenida es la siguiente:

Tabla 3.5 Composición química CEM I 42.5R en % de peso

COMPOSICIÓN QUÍMICA												
	CaO	Si ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Otros	SO ₃	LOI	Total	Na ₂ O _{eq}
wt%	63,8	20,8	3,6	3,5	1,3	0,9	0,2	0,43	2,58	2,8	100	0,8

De este resultado, deducimos el contenido de Na₂O_{eq} que será necesario añadir en solución para llegar al valor establecido por la norma.

En conclusión, la dosificación absoluta que se utiliza en la elaboración de 5 probetas, contando con un 15% de material sobrante, es:

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Tabla 3.6 Dosificación absoluta para 5 probetas cúbicas

	Probetas de control	Probetas activas	Unidades
Cemento	8.15	8.15	kg
Agua	3.67	3.67	kg
Árido Grueso	21.31	19.93	kg
Árido Fino	13.87	14.03	kg
NaOH	42.1	42.1	g

Proceso de elaboración

Para la elaboración de probetas nos desplazamos al Laboratorio de Tecnología de Estructuras situado en el edificio B1 del Campus Nord. Allí disponen de un equipo para amasado de hormigón de eje vertical de unos 60L de capacidad (Figura 3.10).



Figura 3.10 Fotografía de la hormigonera durante el amasado

El paso previo a la elaboración de probetas es la preparación de todos los componentes necesarios de la mezcla. En primer lugar, se lleva a cabo el proceso de tamizado. Con la granulometría ya definida, se hace pasar el árido por los diferentes tamices (Tabla 3.3 y Tabla 3.4). Obtenemos así las diferentes fracciones y las separamos en bolsas para su fácil transporte y almacenamiento. Éste es un trabajo manual y sencillo, pero conlleva mucho tiempo de trabajo.

En el caso del árido de vidrio molido, éste proviene de una planta de reciclado, entonces puede tener muchas impurezas tales como plástico, polvo, etc. Por eso, aplicamos un paso más antes de guardarlo en bolsas: el árido se somete a un proceso de lavado con agua y detergente, de manera que queda totalmente libre de impurezas.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Paralelamente, el cemento también pasa un proceso de tamizado. Con el objetivo de evitar que el cemento empaquetado pueda tener grumos, hacemos pasar todo el polvo de cemento que utilizaremos por el tamiz 0,30 mm. Se trata de un detalle importante, ya que los grumos podrían ocasionar concentraciones puntuales de cemento demasiado grandes dentro de la probeta provocando que las propiedades mecánicas no sean homogéneas.

En segundo lugar, preparamos el agua de mezclado con el añadido de $NaOH$ para conseguir el aporte de álcalis necesario en nuestra mezcla.

Para finalizar la preparación previa a la elaboración, vamos a juntar los moldes de plástico que usaremos para dar forma cúbica a nuestras probetas. Para su fácil desmolde, los untaremos con aceite hidráulico de manera que la mezcla de hormigón no quede adherida a las paredes del molde. Una vez lo tenemos todo listo, trasladamos todos los materiales al Laboratorio de Tecnología de Estructuras.

Realizaremos la misma técnica de mezclado para obtener los dos tipos de probeta (de control y activa). Se realiza en primer lugar la mezcla de las probetas solamente de árido natural. Se hace de esta manera para evitar que puedan quedar restos de vidrio en el recipiente los cuales pasen a formar parte de la mezcla con árido calcáreo.

El primer paso es colocar un recipiente con el volumen necesario en la máquina mezcladora y verter todas las fracciones de árido. Se añade también el cemento. Se pone en marcha la máquina y dejamos que el cemento se mezcle con el árido durante aproximadamente 1 minuto.

Acto seguido, con la máquina funcionando, vamos vertiendo poco a poco el agua de mezclado para que llegue a todos los materiales. En cuanto acabamos de echar toda la disolución, la dejamos mezclándose durante 2 minutos.

El siguiente paso, es apagar la máquina y dejar reposar la mezcla durante aproximadamente 1/2 minuto. Este tiempo se aprovecha para rascar manualmente con una pala los bordes del recipiente de mezclado; de esta manera se pretende evitar que queden restos de mezcla seca en el fondo.

Por último, encendemos la mezcladora de nuevo y dejamos que funcione durante 1 minuto más. En este momento, se debe ver una pasta completamente homogénea. Se deja reposar apenas unos segundos y se procede con el llenado de los moldes (Figura 3.11).



Figura 3.11 Fotografía tomada durante el proceso de llenado de los moldes.

El colado y compactación de las probetas también tiene determinado paso a paso su procedimiento. Como ya hemos explicado, los moldes deberán estar completamente cubiertos con una capa de aceite a modo de facilitar su posterior extracción.

En primer lugar, colocamos el molde en una mesa vibratoria. Ésta nos ayuda a compactar la mezcla reduciendo huecos. Procedemos a llenar el molde aproximadamente hasta la mitad y aplicamos una energía de vibración durante 0,5 minutos (siempre de manera aproximada).

En segundo lugar, acabamos de llenar el molde contando con un pequeño sobrante que rebose por encima del molde. Volvemos a hacer vibrar la mesa para acabar de compactar el resto de la mezcla. Con una espátula, enrasamos la parte superior de la probeta que queda descubierta con la intención de retirar la masa sobrante.

Por último, se cubren cada uno de los moldes con un plástico transparente para evitar que se seque la superficie expuesta al aire (Figura 3.12) y curar durante ± 24 horas para que fragüe la pasta.

Una vez pasado este tiempo de reposo se lleva a cabo el desmolde de las probetas y el marcado de cada una con un número distinto para poder diferenciarlas.



Figura 3.12 Probetas de hormigón durante el curado inicial en sus moldes.

Curado de las probetas

Después de todo el proceso de elaboración, las probetas no están preparadas para ser sometidas a ensayos directamente. Se necesita un periodo de curado que puede durar unos cuantos meses.

Las probetas se introducen en un recipiente utilizando un baño de solución alcalina 1M $NaOH$ y se dejan en una sala de temperatura controlada a unos $23 \pm 1^\circ C$.

Cuando dichas probetas superan la edad de 28 días se aplica un tratamiento de pulido de caras con el objetivo de eliminar imperfecciones en la superficie antes de someterlas a los ensayos.

3.4. Metodología de ensayo

En este apartado se explica el desarrollo necesario para completar los ensayos de expansión libre y expansión confinada que forman parte del estudio de la RAS en probetas de hormigón.

Se realizaron ensayos de expansión con tres estados de carga distintos:

- Ensayo expansión libre (0-0-0): ensayos sin aplicar ningún tipo de carga en las direcciones X-Y-Z. Se desarrollan para establecer una comparación y apreciar los efectos de la expansión confinada.
- Ensayo expansión confinada 1-1-1: ensayos llevados a cabo con la AAR-TM. Se aplica un estado tensional isótropo $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 1MPa$.
- Ensayo expansión confinada 9-9-1: ensayos llevados a cabo también en la AAR-TM. Se aumenta la carga en las dos direcciones horizontales para estudiar la diferencia con el estado tensional $\sigma_x = \sigma_y = 9MPa$; $\sigma_z = 1MPa$.

Solamente el ensayo con el estado tensional 9-9-1 con probetas activas, fue el desarrollado en la parte experimental de este trabajo. La información referente, tanto al

procedimiento como a los resultados de los otros ensayos de este capítulo, ha sido proporcionada por J. Liaudat (DECA).

Ensayos de expansión libre

Como se ha apuntado, se desarrollaron un seguido de ensayos adicionales a los de expansión confinada sin aplicar ningún tipo de carga para tener unos primeros resultados con los que comparar.

Se ensayaron tres probeta de control y cuatro activas. Se utilizó una más de las probetas con vidrio reactivo con diferente edad para evaluar el efecto del tiempo de curado sobre las expansiones. En la tabla siguiente se muestran las probetas empleadas en estos ensayos con su respectiva identificación:

Tabla 3.7 Probetas cúbicas utilizadas en ensayo de expansión libre

Número de probeta	Tipo	Tiempo de curado
TM-01	Activa	272 días
TM-05	Control	96 días
TM-06	Control	96 días
TM-07	Control	96 días
TM-10	Activa	96 días
TM-12	Activa	96 días
TM-13	Activa	96 días

Este tipo de ensayo de expansión libre consiste en tomar diferentes medidas, con un periodo de tiempo determinado, con la utilización de un extensómetro digital (Figura 3.13). Éste tiene una base de medida 100 mm y su resolución es de 1 μ m.



Figura 3.13 Fotografía tomada durante una medida con el extensómetro digital.

Las probetas utilizadas en este tipo de ensayo, tienen unas piezas de contacto de acero inoxidable pegadas con epoxi que permiten la toma de medidas con el extensómetro. Tienen cuatro puntos de referencia en cada dirección distribuidos de la manera siguiente:

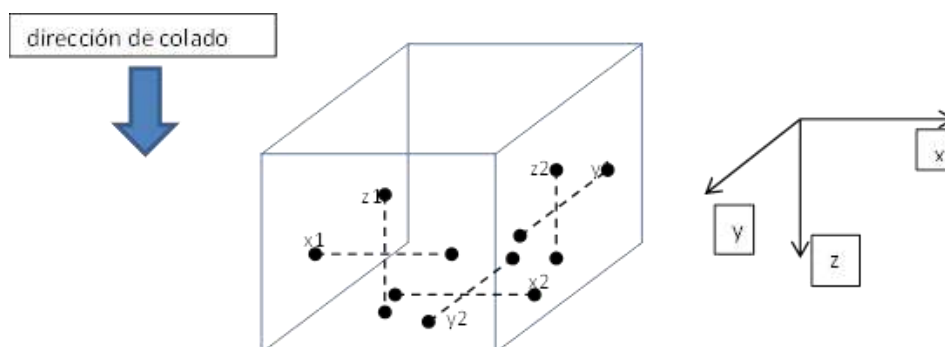


Figura 3.14 Esquema de la ubicación de los terminales de medida.

En cada medida, se toman los valores de deformación con el extensómetro y se registra el peso de la probeta durante su periodo de curado. Una vez en el horno, es decir durante la etapa de exposición, se toman también valores con el extensómetro y se pesan las probetas una vez a la semana. Pasado el primer mes, el intervalo aumenta y se pasa a tomar medidas cada dos semanas o más.

Se utiliza este tipo de ensayo ya que la AAR-TM no está preparada para llevar a cabo experimentos con un estado tensional 0-0-0. Para poder realizar un ensayo, la carga mínima debe ser de 1MPa para que los platos estén en contacto con la probeta.

Ensayos de expansión confinada en AAR-TM

Una vez realizados los ensayos de expansión libre nos introducimos por completo en el marco de la expansión confinada. Se someten ahora las probetas cúbicas de hormigón a un estado tensional 1-1-1 ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 1MPa$) y 9-9-1 ($\sigma_x = \sigma_y = 9MPa$; $\sigma_z = 1MPa$). Por tanto, para el desarrollo de los ensayos se utiliza la AAR-TM.

Se destaca que el estado tensional 1-1-1 no se ha desarrollado dentro de este trabajo como se ha remarcado en el anteriormente. Solamente el estado tensional 9-9-1 con probetas activas forma parte de la fase experimental de este proyecto.

La temperatura de ensayo será constante a 60°C.

Se realizan dos experimentos para cada uno de los estados tensionales, uno utilizando una probeta de control con árido natural y el otro con una probeta activa con árido de vidrio triturado, como se especifica en Tabla 3.8 y Tabla 3.9.

Tabla 3.8 Probetas utilizadas en ensayo de expansión confinada 1-1-1.

Número de probeta	Tipo	Tiempo de curado
TM-02	Activa	293 días
TM-03	Control	272 días

Tabla 3.9 Probetas utilizadas en ensayo de expansión confinada 9-9-1

Número de probeta	Tipo	Tiempo de curado
TM-08	Control	236 días
TM-11	Activa	299 días

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Antes de empezar los ensayos, es necesaria una semana de preparación previa de la probeta y la AAR-TM. El primer paso es extraer la probeta cubica del curado (apartado 3.3), y dejar que se seque durante al aire libre 24 horas. El segundo paso es untar con silicona todas sus esquinas, para ayudar a su confinamiento posterior, y dejar secar un día más (Figura 3.15-izquierda). Realizamos este paso dos veces para cubrir bien todas sus esquinas.

Después pasamos a colocar la probeta en su posición dentro de la máquina. A la vez, se sitúan también los platos en su cilindro de carga correspondiente y se sellan las juntas entre platos también con silicona (Figura 3.15-derecha). Además, introducimos en su posición los tubos que forman el circuito del líquido y se instalan cuidadosamente los LVDT enroscando sus varillas a los platos pasivos. Se deja secar la silicona de nuevo.



Figura 3.15 Probeta cúbica antes de ensayar. Con las esquinas cubiertas de silicona (izquierda); colocada entre platos y untando las juntas con silicona (derecha).

Una vez la probeta está colocada en su posición, se deja circular agua para comprobar que la silicona ha fijado correctamente y no hay fugas de líquido. En el caso de no haber ninguna fuga, se introduce una solución alcalina 1M $NaOH$ (aproximadamente total de 20L) que entra en el circuito y se pone en contacto directo con la probeta en el confinamiento. El circuito se cierra dejando que la probeta quede saturada completamente de solución durante 24 horas.

Es entonces cuando, se enciende el calentador y se introduce en el ordenador que la temperatura media de la probeta debe ser de 60°C. Se deja circular la solución alcalina.

Por último, cuando la temperatura ha llegado a su valor determinado, se conectan las tres bombas y se determina el estado tensional deseado. En el momento en que se establece el estado tensional, es cuando se activa la adquisición de datos. Es ahí cuando comienza el ensayo.

La duración media del experimento suele ser de unas tres semanas, sin contar los pasos previos (elaboración de probetas, calibración, etc.). Un ensayo de este tipo generalmente se detiene cuando hay alguna fuga de líquido que pueda comprometer los componentes de la máquina o provocar algún cortocircuito, también puede deberse a un fallo de alguno de los dispositivos que componen el sistema (bomba, calentador...).

3.5. Resultados

En este apartado se presentan los resultados experimentales obtenidos.

Ensayo de expansión libre (0-0-0)

Aquí se comparan y se discuten los resultados obtenidos de los ensayos de expansión libre 0-0-0. Como se ha dicho en el capítulo 3.4, estos ensayos no han sido desarrollados durante este trabajo, toda la información ha sido proporcionada por J. Liaudat (DECA). Conforme a las medidas tomadas en laboratorio, las curvas obtenidas serán expansión-tiempo, variación de peso-tiempo y relación peso-deformación.

En primer lugar nos detenemos a observar las curvas de expansión libre:

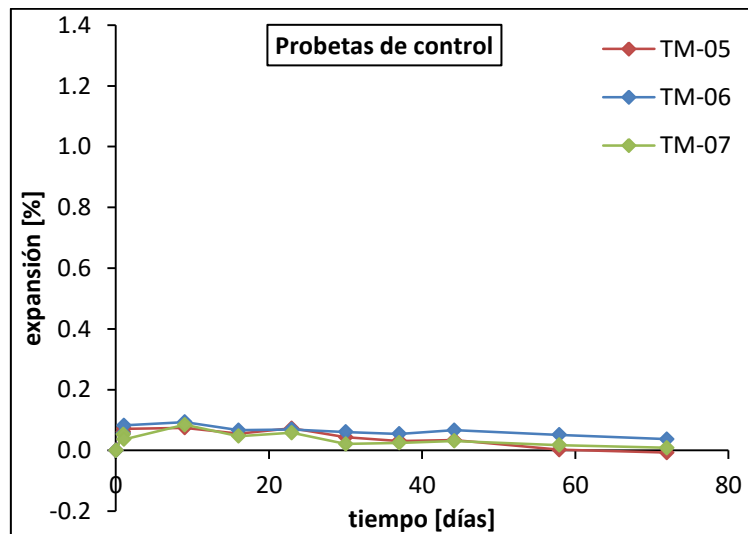


Figura 3.16 Expansión libre de probetas de control respecto al tiempo. Promedio del valor de las tres direcciones. Se toma como estado de referencia la primera medida a 23°C.

Si se muestra atención se aprecia una leve expansión inicial correspondiente a la dilatación térmica al pasar de la temperatura controlada del laboratorio de 23°C e introducirse en el horno a 60°C (Figura 3.16). Durante el tiempo en exposición, la probeta se estabiliza mostrando una tendencia a contraerse en su tramo final.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

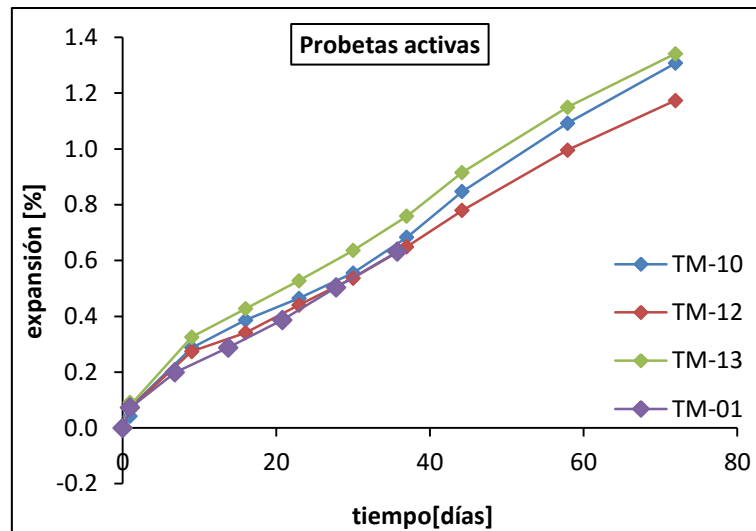


Figura 3.17 Expansión libre de probetas activas respecto al tiempo. Promedio del valor de las tres direcciones. Se toma como estado de referencia la primera medida a 23°C.

El comportamiento de las probetas activas respecto a las de control es completamente distinto (Figura 3.17). Claramente el árido de vidrio reactivo provoca un crecimiento lineal del volumen de la probeta. Se muestra además que la probeta TM-01 con un tiempo de curado mayor (272 días), parece que expande también a tasa constante igual que el resto.

En segundo lugar nos detenemos a observar las curvas de variación de peso:

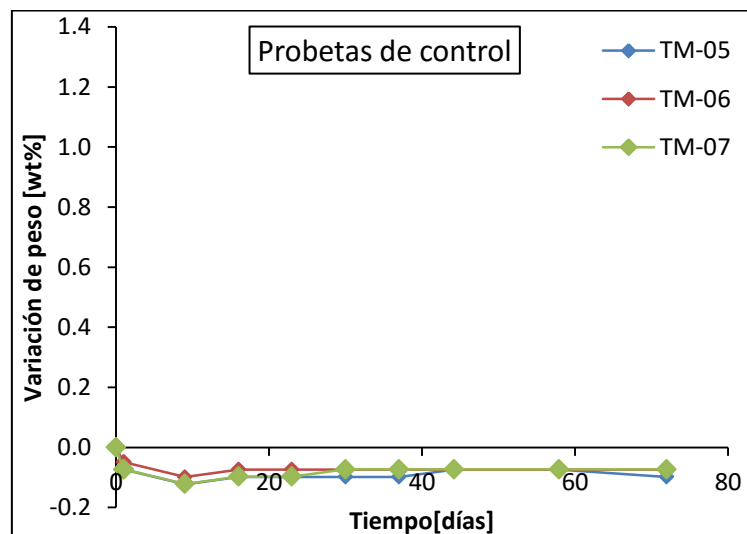


Figura 3.18 Variación de peso con probetas de control respecto al tiempo. Se toma como estado de referencia la primera medida a 23°C.

Como en el caso de la expansión, se muestra una diferencia en el comportamiento de las probetas en los primeros días respecto al final del experimento. Se ve como ocurre una caída de peso inicial debido al cambio de temperatura en el momento que las probetas de control entran en el horno. El registro de variación de peso se va estabilizando durante el periodo de exposición acabando con una tendencia prácticamente constante.

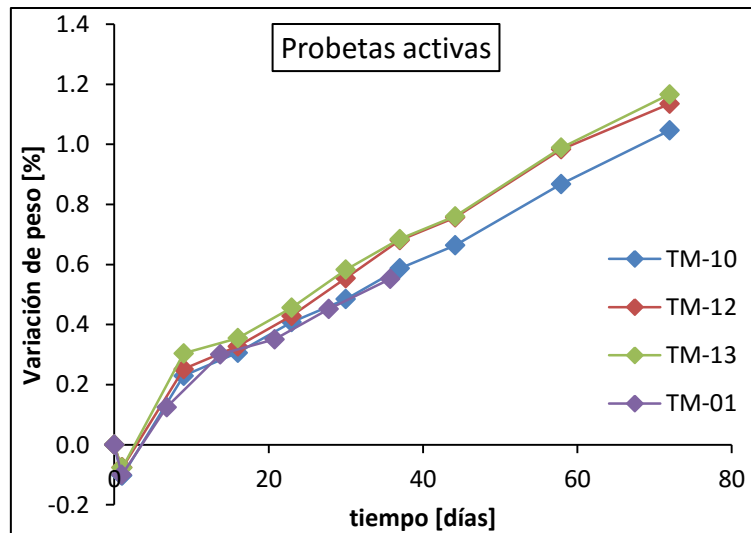


Figura 3.19 Gráfica variación de peso con probetas activas respecto al tiempo. Se toma como estado de referencia la primera medida a 23°C.

Alternativamente, las probetas activas muestran exactamente la misma caída de peso debido al cambio de temperatura al introducir las probetas en el horno. En cambio, durante el periodo de exposición cambia por completo su tendencia. Se observa claramente como las probetas activas acaban adoptando un crecimiento constante de su peso. Cabe apuntar, que no se muestran diferencias significativas en los registros de peso entre la probeta TM-01 y el resto con un tiempo de curado menor.

En tercer lugar nos detenemos a observar la relación peso-deformación:

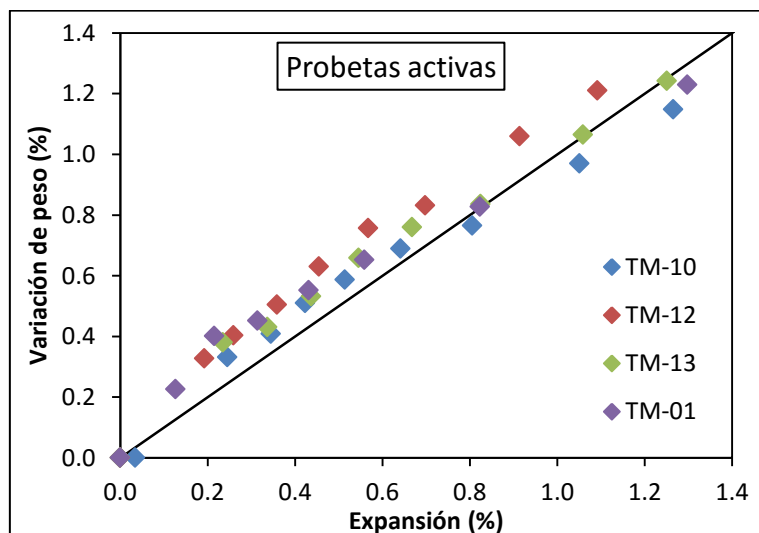


Figura 3.20 Variación de peso vs deformación con probetas activas. Se toma como referencia la primera medida tomada en el periodo de exposición a 60°C.

Visiblemente, se aprecia que los puntos registrados tienden a alinearse indicando que existe una correlación entre la variación de peso y las expansiones en probetas elaboradas con vidrio molido reactivo.

Cabe destacar que tras una semana de exposición, las probetas activas ya muestran exudaciones del gel en la superficie de la probeta y visible fisuración. Se aprecia este resultado en la figura siguiente:



Figura 3.21 Detalle de exudación del gel y aparición de fisuras en TM-13 en una semana de exposición

Ensayos de expansión confinada 1-1-1

En este apartado se comparan y se discuten los resultados obtenidos de los ensayos de expansión confinada 1-1-1. Conforme a los registros de la AAR-TM se procede a representar las curvas de temperatura, tensiones y deformaciones en función del tiempo.

En primer lugar nos detenemos a observar las gráficas registradas para la probeta de control TM-03:

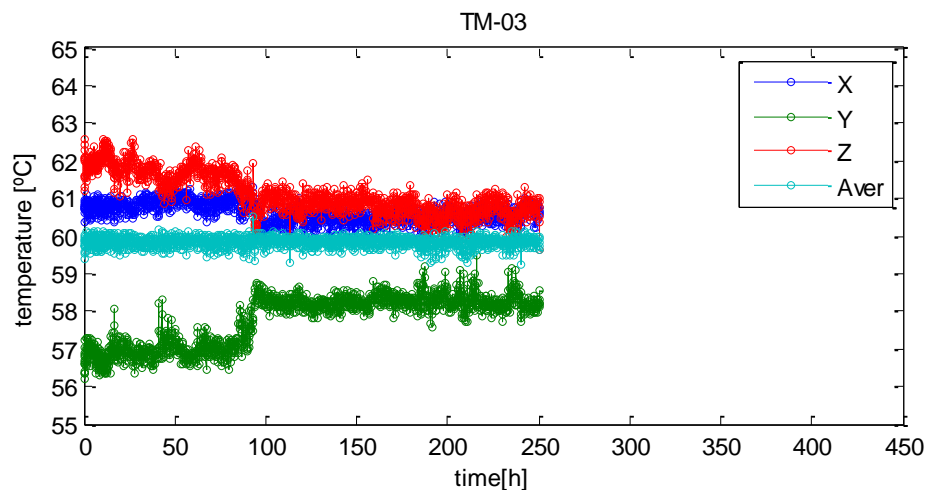


Figura 3.22 Variación de temperatura en función del tiempo para probeta de control TM-03

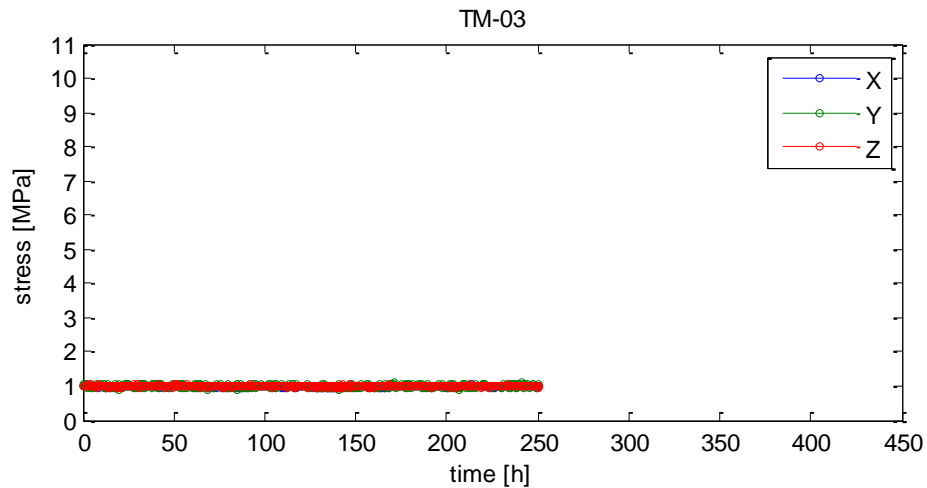


Figura 3.23 Variación de tensiones en función del tiempo para probeta de control TM-03

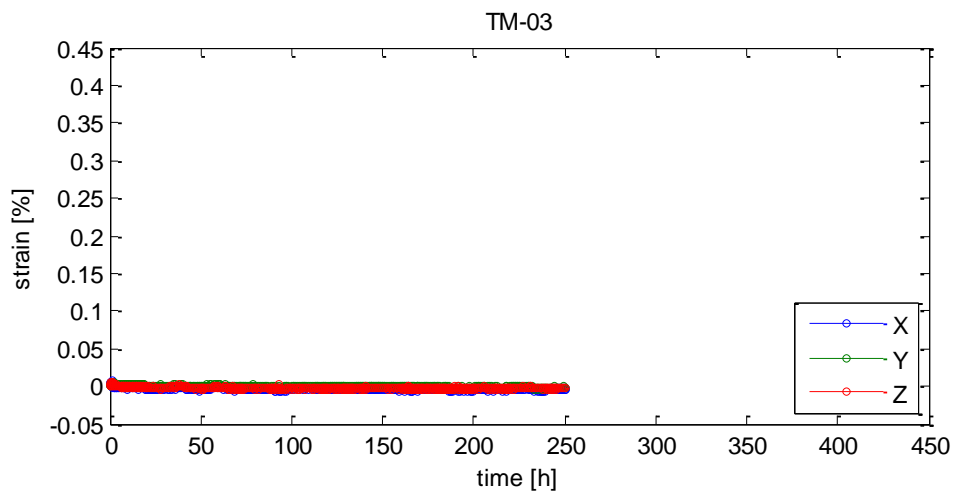


Figura 3.24 Deformaciones en función del tiempo para probeta de control TM-03

A partir de las curvas representadas, llegamos a la conclusión de que la probeta no ha sufrido prácticamente deformaciones (Figura 3.24). Se puede apreciar una mínima contracción si se observa con detalle de apenas 0,004%; un efecto prácticamente insignificante. Dicha contracción puede tratarse de una deformación elástica debida a la presencia de las cargas.

No se ve ningún cambio aparente en los registros de carga aplicada (Figura 3.23). En el caso de observar con más detalle, si se pueden notar ciclos de carga-descarga debidos a posibles pérdidas puntuales y aportes de presión del sistema de carga. En cualquier caso, consideramos que las tres direcciones se mantienen con un valor constante de 1 MPa durante todo el ensayo.

Es cierto que los registros de temperatura en los platos tienen una dispersión destacable, este efecto es provocado por la circulación de la solución. Inevitablemente, el circuito va pasando por cada plato en serie, de manera que tiene lugar un efecto de refrigeración que hace variar la temperatura notablemente en cada plato. En cualquier caso, nosotros tomamos como referencia el valor promedio de los tres platos (Figura 3.22) el cual se mantiene constante a 60°C.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

En segundo lugar nos detenemos a observar las gráficas registradas para la probeta activa TM-02:

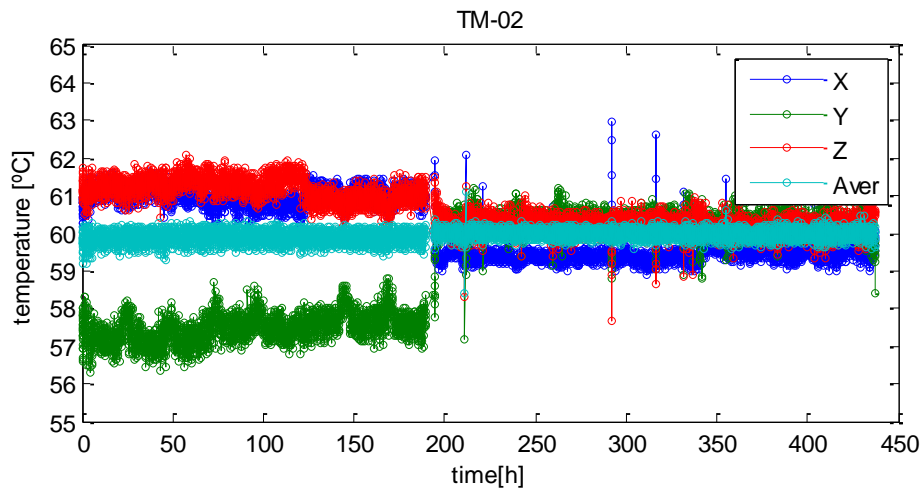


Figura 3.25 Variación de temperatura en función del tiempo para probeta activa TM-02

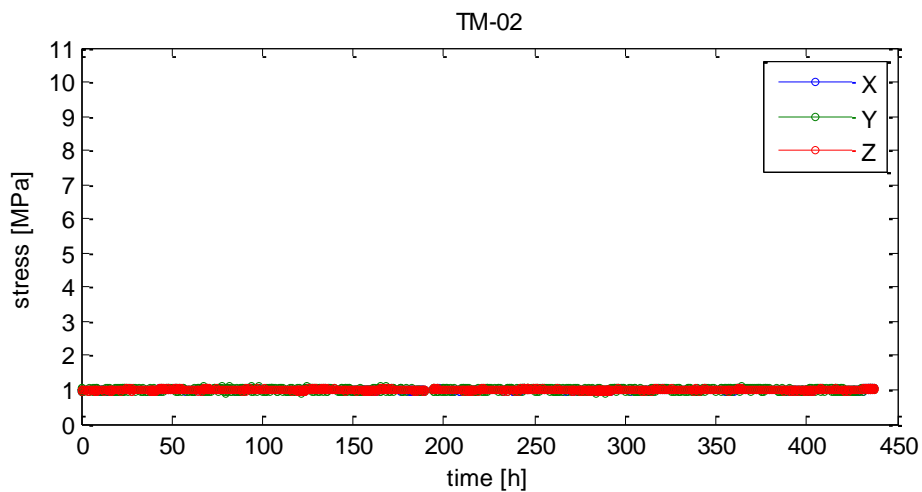


Figura 3.26 Variación de tensiones en función del tiempo para probeta activa TM-02

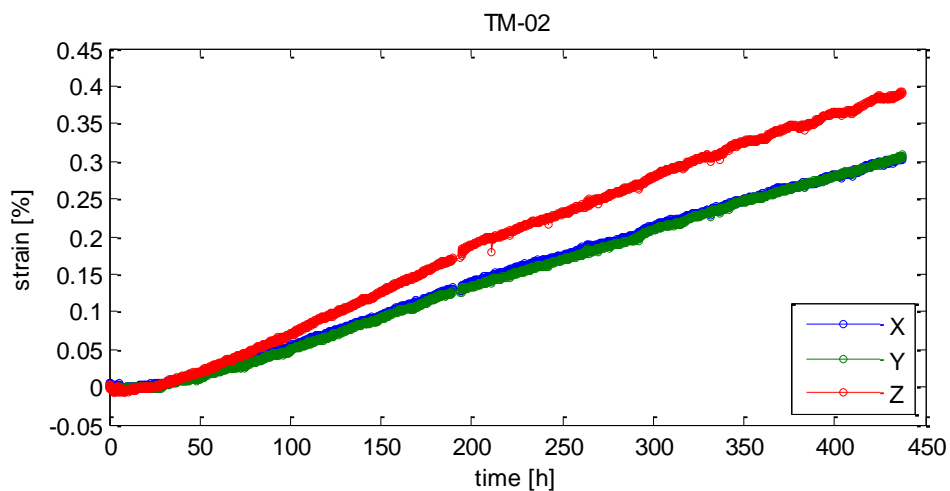


Figura 3.27 Deformaciones en función del tiempo para probeta activa TM-02

Según los valores registrados para la probeta activa, se observa un comportamiento prácticamente idéntico en las curvas de temperatura y tensiones a los de la probeta de control (Figura 3.25 y Figura 3.26).

La temperatura media de los platos se mantiene constante a 60°C, con pequeños cambios puntuales que se recuperan rápidamente. Es necesario destacar que aparece un salto en los registros de temperatura de los platos debido a una reducción del caudal del fluido. Este cambio fue improvisado durante el ensayo para poder prolongarlo el tiempo del experimento y fue provocado por un fallo en el calentador del depósito de fluido. De manera que, para evitar una alteración significativa en la temperatura, se decidió hacer circular el líquido puntualmente y se suspendió la adquisición de datos hasta no estabilizar de nuevo la temperatura.

Por otra parte, se aprecia un claro cambio en los registros de deformaciones (Figura 3.27). Se muestra claramente una tasa de expansión constante llegando a un valor máximo de 0,4%. Se destaca que las deformaciones son distintas dependiendo de la dirección donde se aplica la carga. En este caso, las direcciones horizontales X-Y siguen un crecimiento prácticamente idéntico, pero la dirección Z tiene una tasa de crecimiento mayor. Este efecto podría deberse a una anisotropía de la probeta en la dirección de colado (la dirección de colado siempre se coloca respecto al eje vertical), sin embargo, no se manifestó nada parecido en los ensayos de expansión libre.

Cabe apuntar, que se manifiesta la estrecha relación entre la temperatura y la tasa de expansión. Entorno a las 190 horas, cuando tiene lugar el salto de registro de temperatura explicado, se observa un pequeño salto en las curvas de deformaciones que se estabiliza durante el resto del ensayo.

Ensayos de expansión confinada 9-9-1

En este apartado se comparan y se discuten los resultados obtenidos de los ensayos de expansión confinada 9-9-1. Conforme a los registros de la AAR-TM se procede a representar las curvas de temperatura, tensiones y deformaciones en función del tiempo.

En primer lugar nos detenemos a observar las gráficas registradas para la probeta de control TM-08:

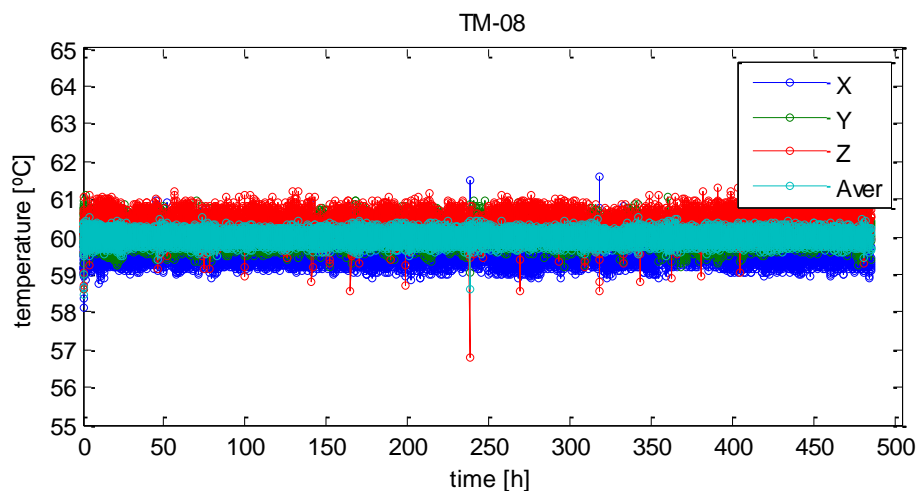


Figura 3.28 Variación de temperatura en función del tiempo para probeta de control TM-08

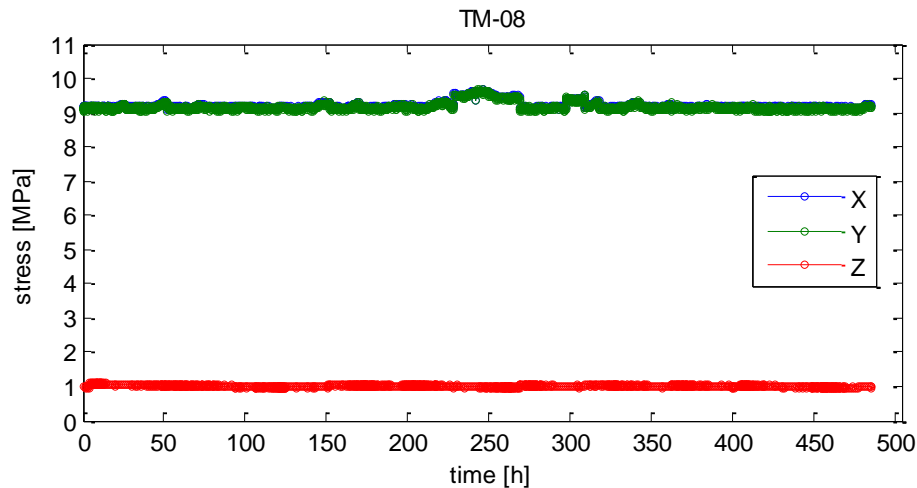


Figura 3.29 Variación de tensiones en función del tiempo para probeta de control TM-08

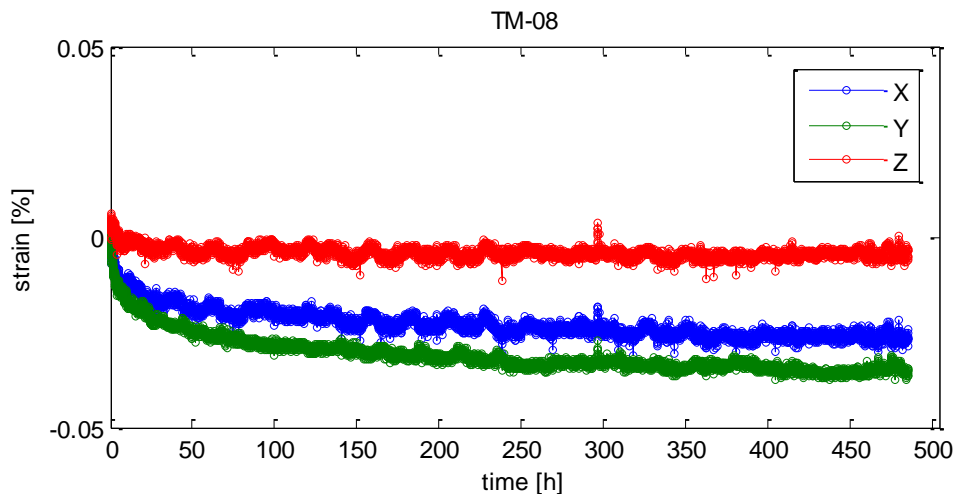


Figura 3.30 Detalle de deformaciones en función del tiempo para probeta de control TM-08

Claramente se muestra que la temperatura ha sido constante a 60°C durante todo el ensayo, incluso se observa una dispersión menor que en otros ensayos (Figura 3.28). Hay que apuntar un fallo técnico que surgió justo al inicio del ensayo: el calentador de depósito del fluido dejó de funcionar (igual que en el ensayo 1-1-1), por lo que se hizo circular la solución puntualmente hasta estabilizar la temperatura.

En el caso de los registros de tensiones (Figura 3.29), el valor de los ejes horizontales X-Y se mantiene a 9MPa y el eje horizontal a 1MPa. Se nota que entorno a las 250 horas del ensayo, se registra una sobrepresión en los ejes horizontales seguramente debido a un cambio en la temperatura ambiente. Este efecto se considera insignificante ya que no interfiere en los resultados de expansión.

Por otro lado, se muestra una variación muy pequeña en la tasa de expansión de la probeta (Figura 3.30). Se decide mostrar una escala más detallada para poder observar con claridad la situación: se aprecia una contracción de la probeta debido al efecto *creep*, o deformación por fluencia lenta. Como la carga aplicada en los ejes horizontales es mayor a la del eje Z, dicha contracción es más evidente en X-Y.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

En segundo lugar nos detenemos a observar las gráficas registradas para la probeta activa TM-11:

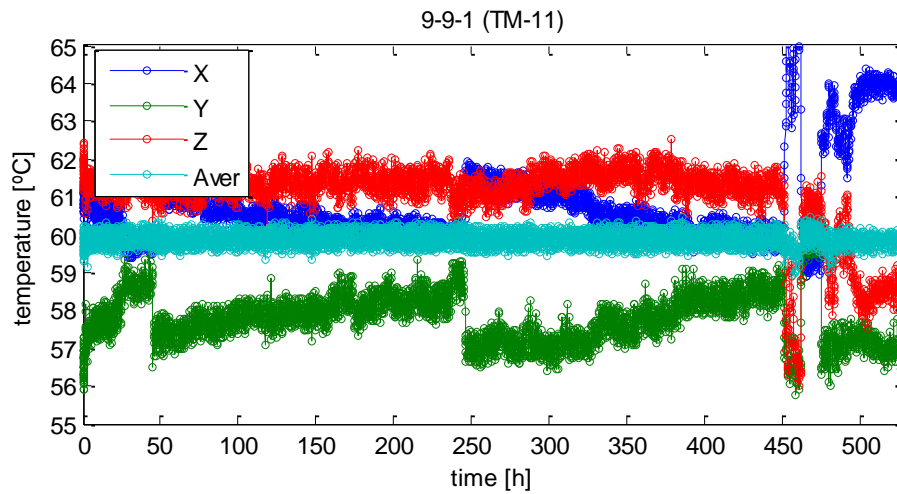


Figura 3.31 Variación de temperatura en función del tiempo para probeta activa TM-11

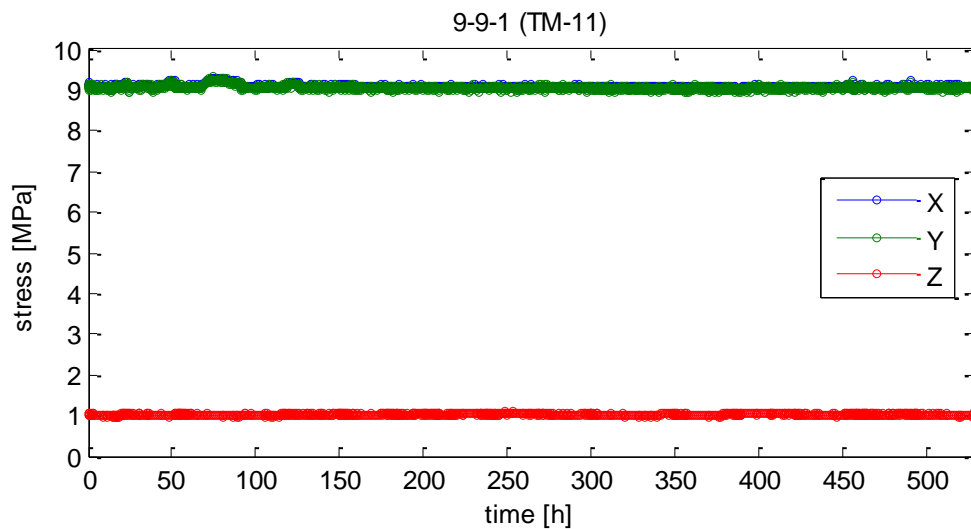


Figura 3.32 Variación de tensiones en función del tiempo para probeta activa TM-11

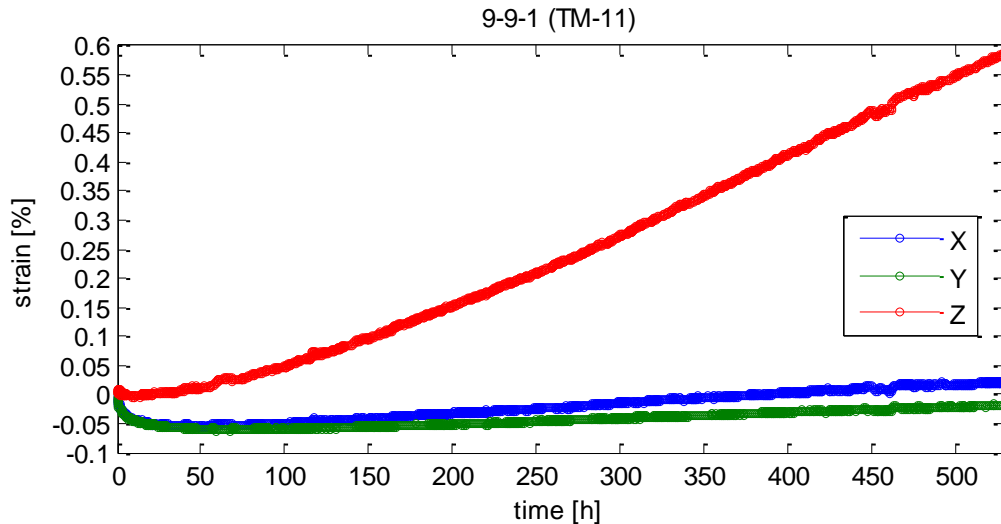


Figura 3.33 Expansión en función del tiempo para probeta activa TM-11

De la misma manera que en los ensayos anteriores, se observa que el promedio de la temperatura se mantiene constante a 60°C (Figura 3.31). No obstante, si nos detenemos a analizar los registros de temperatura en cada plato se reflejan una gran dispersión y ciertos puntos de gran variación de valores. Este efecto puede deberse a los ciclos de apagado y encendido del calentador del depósito de solución y a las oscilaciones de la temperatura ambiente.

A causa del fallo del calentador en el ensayo anterior, se instaló un nuevo calentador en el depósito de fluido con mayor potencia. Al finalizar el ensayo, se podía ver que este nuevo calentador había sufrido daños por la corrosión de la solución alcalina. En cuanto a los registros de temperatura, suponemos que en el primer tramo, la distorsión de los valores medidos pueden deberse a variaciones puntuales del caudal de circulación; en el tramo final, los saltos de valor seguramente correspondan al tramo en que el calentador ya no funcionaba correctamente y hubo que hacer ajustes manualmente del caudal para mantener la temperatura.

Centrándonos en el curva de variación de tensiones (Figura 3.32), se muestra que tanto los valores del eje Z como los de los ejes X-Y mantienen prácticamente constantes a 1MPa y 9Mpa, respectivamente. Si se observa con detalle el eje Z, se muestran pequeñas variaciones debidas al ciclo de carga-descarga correspondiente a mínimas pérdidas de presión del sistema durante el ensayo y a la represurización del nitrógeno en el intercambiador de presión. En cuanto a los ejes X-Y, las pequeñas variaciones que puedan aparecer se deben a los cambios en la temperatura ambiente y al ajuste manual de presión en el caso de haber sobrepresiones.

Se estudia ahora la curva de deformaciones (Figura 3.33). En ella, se aprecia una contracción inicial de la probeta debido al efecto *creep* en todas las direcciones, aunque el efecto es más excesivo en las direcciones (X-Y) más cargadas. Pasado este efecto *creep*, se registran expansiones con una tendencia lineal en las tres direcciones: claramente, el eje Z (menos cargado, 1MPa) registra una deformación mayor a los ejes horizontales; a su vez, la tasa de expansión en los ejes X-Y refleja una pendiente diferente. Posiblemente, este efecto sea consecuencia directa de un contacto desigual plato-probeta en dichas direcciones horizontales.

3.6. Discusión de resultados para ensayos de expansión confinada

Una vez descriptos todos los ensayos realizados de manera detallada, procedemos con la comparación y discusión de los resultados obtenidos. Es importante comparar las curvas de manera que se vea claramente cuál ha sido el comportamiento de cada una de las probetas sometidas a los diferentes estados tensionales.

En primer lugar, se muestran de nuevo las curvas de deformaciones de cada uno de los ensayos llevadas a cabo con probetas activas:

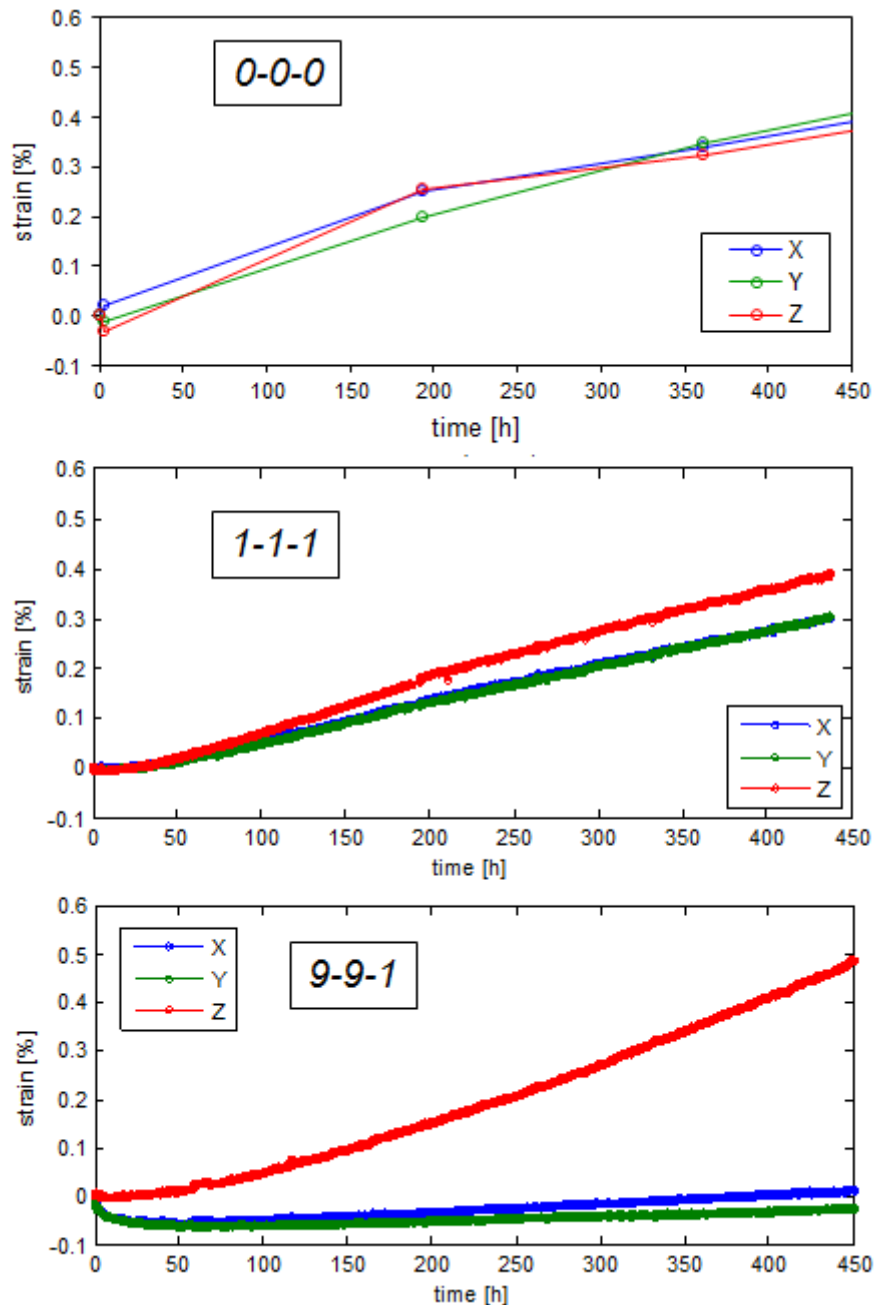


Figura 3.34 Recopilación de las tres gráficas resultantes de los ensayos realizados con probetas activas

Observando la representación de los registros para los ensayos isótropos 0-0-0 y 1-1-1, nos damos cuenta de que las deformaciones sufridas por las probetas se asemejan bastante. Aparece una expansión lineal en ambos casos cuya pendiente es muy similar.

En el caso de los ensayos de la AAR-TM, se manifiesta una contracción inicial debida al efecto *creep*, resultado de someter la probeta a un estado tensional permanente. Después, dicha contracción se va contrarrestando por las expansiones producidas por la RAS, alcanzando así un crecimiento estable.

En los tres casos, observamos que la dirección Z (vertical) se comporta de manera distinta a las direcciones horizontales, efecto seguramente debido a la dirección de colado de la mezcla.

Volviendo a la peculiaridad del eje Z, en el estado tensional 9-9-1 se manifiesta una expansión más lenta en las primeras horas en comparación con el caso 1-1-1. Pero en el caso 9-9-1, la pendiente va creciendo paulatinamente consiguiendo un valor máximo final superior al estado isótropo comentado.

Se detecta entonces, que puede existir una diferencia en las deformaciones volumétricas resultantes para cada uno de los ensayos realizados. Se superponen las curvas de deformación calculando la variación en el volumen de las probetas de la manera siguiente:

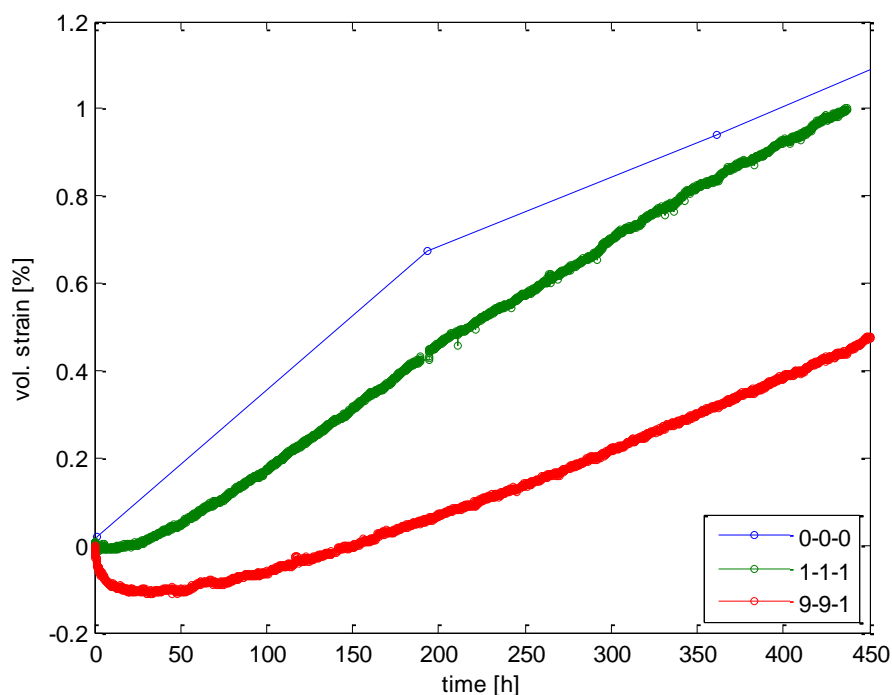


Figura 3.35 Deformación volumétrica de las probetas activas en función del estado tensional aplicado

Según la teoría expuesta por Multon & Toutlemonde (2006), bajo tensiones de compresión menores de 10MPa, existe una transferencia de expansión de RAS de las direcciones más comprimidas a las que menos lo están, de manera que la expansión volumétrica total sea constante (referencia Capítulo 2.3).

Con estos resultados pues, se observa que no se cumple la hipótesis planteada, considerando que no hay transferencia de expansiones. Aun así, los ensayos llevados a cabo no son suficientes para poder elaborar ninguna conclusión definitiva.

4. Ensayos de expansión libre con mortero de árido de basáltico

4.1. Introducción

El capítulo que sigue a continuación, explica el desarrollo y conclusiones de una serie de ensayos de expansión libre sobre probetas cilíndricas elaboradas con un tipo de árido de basalto.

Estos experimentos se realizaron para caracterizar dicho tipo de árido de origen natural. En un primer momento, fue importada una pequeña muestra del árido basáltico de fracción 6-20 cm desde una cantera de Argentina. El grupo MECMAT, realizó pruebas de expansión libre con probetas cilíndricas de hormigón con este árido para comprobar su reactividad. La metodología utilizada para los ensayos fue desarrollados por MECMAT, no se trata de un ensayo estándar.

Los ensayos dieron resultados según lo previsto. Por eso más adelante se trajo una cantidad mayor, dividida en dos fracciones distintas: una muestra de 6-20mm; y otra muestra de 100mm. Las dos muestras importadas provienen de la misma cantera, pero podría ser que su origen esté en distintos frentes de explotación. Para comprobar si estas dos muestras (6-20mm y 100mm) tienen la misma reactividad ante la RAS que la primera muestra, se desarrollan los mismos ensayos de expansión libre.

Estos experimentos se llevan a cabo en el mismo laboratorio de geotecnia del Departament D'enginyeria Civil i Ambiental (DECA) de la Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

El experimento se divide en dos fases: una primera de curado a temperatura ambiente y una segunda fase de exposición introducidas en un horno. Durante las dos etapas, las probetas permanecen inmersas en un baño de solución alcalina 1M *NaOH*.

Para este tipo de pruebas, se emplean probetas cilíndricas, de 33mm de diámetro por 66mm de altura, elaboradas con un mortero de árido basáltico.

Se explica en los apartados siguientes de manera más detallada, cómo se han elaborado las probetas, la metodología de ensayo seguida y la discusión e interpretación de los resultados obtenidos.

4.2. El árido basáltico

El árido basáltico ensayado es utilizado en abundancia en Argentina como áridos en la elaboración de hormigones (Figura 4.1). Se trata de un tipo de árido que en general

presenta buenas condiciones de servicio, pero en numerosos casos se han manifestado efectos de RAS, tales como grietas o popouts (Rocco et al. 2012).



Figura 4.1 Muestras de árido basáltico, fracciones de 6-20mm y 100mm

Según el estudio expuesto en Rocco et al. (2012), se ensayaron muestras de basalto provenientes de Corrientes, Argentina. Visto al microscopio, se observó que las muestras estaban constituidas por tablillas de plagioclasas (andesita), piroxenos, óxidos e hidróxidos de hierro, vidrio volcánico y arcillas, entre otros componentes. La composición mineralógica de este árido lo caracteriza como potencialmente reactivo.

En la referencia de Batic et al. (1994), se muestra los resultados de expansión del ensayo del mismo tipo árido utilizado en este trabajo. En la Figura 4.2 se han representado los resultados de Batic et al. (1994) de la diferencia en la reactividad cuando el porcentaje de contenido de álcalis en el cemento aumenta.

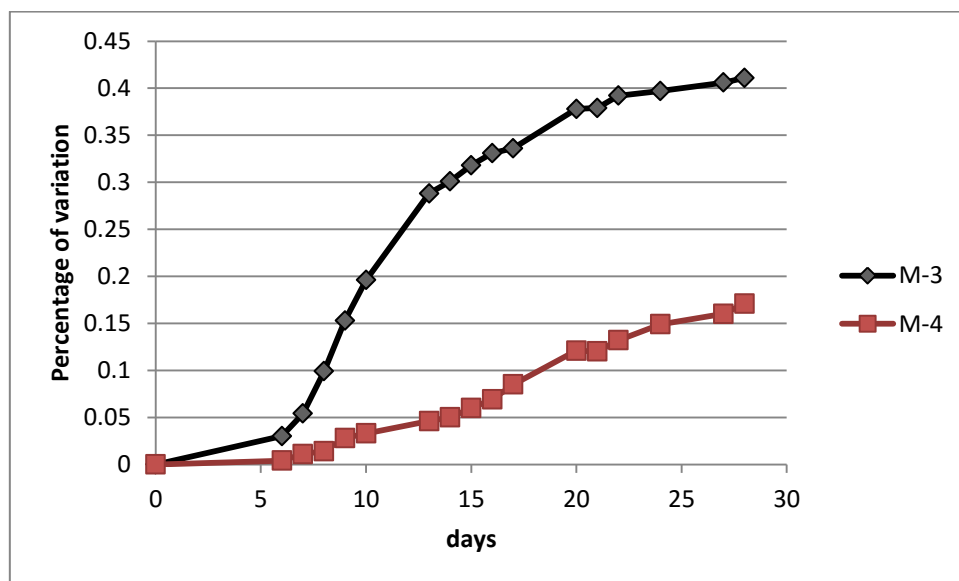


Figura 4.2 Porcentaje de variación de árido basáltico para diferentes contenidos de álcalis. M-3 Alto contenido de álcalis; M-4 Bajo contenido de álcalis. Batic et al. (1994)

4.3. Elaboración de probetas

Es oportuno comenzar a explicar este capítulo de manera cronológica. Lo primero que es necesario saber antes de introducirnos con la metodología de los ensayos, es la clase de probetas utilizadas.

Se elaboran 8 probetas de mortero para estos ensayos (Tabla 4.1). La mitad pertenecen a una muestra de 6-20mm y la otra mitad a la segunda muestra de 100mm. De este modo podemos calcular un promedio más fiable de los registros de peso y deformaciones.

Tabla 4.1 Identificación probetas de árido natural utilizadas en el ensayo de expansión libre

Id	Recipiente	Muestra
Mi-17	Recipiente 16	6-20 cm
Mi-18	Recipiente 16	6-20 cm
Mi-19	Recipiente 17	6-20 cm
Mi-20	Recipiente 17	6-20 cm
Mi-21	Recipiente 18	100 mm
Mi-22	Recipiente 18	100 mm
Mi-23	Recipiente 21	100 mm
Mi-24	Recipiente21	100 mm

Materiales

Cemento

Para la elaboración de las probetas cilíndricas se utiliza cemento gris Tipo I 42.5R definido según norma UNE-EN 197:1, el mismo utilizado para la elaboración de probetas cúbicas descrita en el Apartado 3.3.

Con el objetivo de conocer la cantidad de álcalis que contiene este tipo de cemento, se realizarán pruebas en laboratorio con dos muestras del mismo. De esta manera, se calcula un promedio de los valores de composición obtenidos. Los resultados ya han sido mostrados anteriormente en la Tabla 3.5.

Se obtiene que el cemento contiene un 0,85% en peso de Na_2O_{eq} . Así pues, con un cálculo rápido se deduce la cantidad de $NaOH$ que se debe añadir en solución a la pasta de cemento.

Se apunta también que el peso específico del cemento es de 3150 kg/m³, datos necesarios para obtener el cálculo de las cantidades necesarias.

Con el objetivo de evitar que el cemento empaquetado pueda tener grumos o impurezas, antes de utilizarlo, se remueve todo el polvo de cemento haciéndolo pasar por el tamiz 0,30mm.

Áridos

De la misma manera, nos regimos por la granulometría propuesta:

Tabla 4.2 Granulometría del árido

PROBETAS CILÍNDRICAS			
Tipo de árido	Pasa (mm)	Retenido (mm)	Peso (%)
Basalto triturado	4,55	2,00	10,0
	2,00	1,18	25,0
	1,18	0,52	25,0
	0,52	0,30	25,0
	0,30	0,15	15,0

El árido viene dividido en fracciones de aproximadamente 6-20mm y 100mm. Para conseguir la dosificación deseada, hay que triturarlo manualmente: utilizamos una maza y un pico para la fracción gruesa; usamos un mortero para las fracciones más finas.

Dosificación

Para la dosificación de las probetas se sigue la relación:

Tabla 4.3 Valores de dosificación de las probetas

DOSIFICACIÓN DE LAS PROBETAS	
Relación agua cemento	$w/c = 0,47$
Relación árido cemento	$agg/c = 2,25$
Contenido total de álcalis	$[Na_2O_{eq}] = 1\%$ del peso del cemento

Según Rocco et al. (2012), el peso específico del árido basáltico de 2950 kg/m³.

Para completar el contenido de álcalis necesarios, en caso de que la aportación de cemento no llegue al valor establecido, añadiremos *NaOH* al agua de mezclado

Todos estos valores definidos harán referencia a la elaboración de 4 probetas para una de las muestras. Es decir, realizaremos la misma cantidad de materiales para cada muestra.

Teniendo en cuenta que puede haber pérdidas de mezcla durante la elaboración de probetas, añadiremos un 20% extra de materiales para prevenir problemas. Finalmente, se calculan las cantidades absolutas del mortero que vamos a utilizar:

Tabla 4.4 Dosificación absoluta para 4 probetas cilíndricas

	Probetas	Unidades
Cemento	174.8	g
Agua	82.2	g
Árido	393.3	g
NaOH	0.26	g

Proceso de elaboración

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Mezcla del mortero

En un recipiente de mezclado bien limpio primero vertemos el agua y añadimos el $NaOH$ (en partículas sólidas) necesario para alcanzar el contenido de Na_2O_{eq} buscado (Apartado 2.3). Vertemos todo el contenido de cemento paulatinamente y removemos durante 2 minutos con una espátula. Es importante evitar que queden grumos.

Seguidamente, continuamos agregando las fracciones de árido. De manera ordenada, vamos echando de la fracción más fina a la más gruesa despacio con el objetivo de facilitar su mezcla. Este paso debe tener una duración de 10 minutos.



Figura 4.3 Fotografía tomada en laboratorio durante la elaboración de probetas cilíndricas con árido natural

Llenado de moldes

Los moldes han sido diseñados a medida para dar como resultado estas probetas de 33mm de diámetro y 66mm de altura. Previamente a su llenado, es imprescindible untar toda la superficie de los moldes con aceite con la intención de facilitar el trabajo en el momento de desmoldar.

Para conseguir un ajuste adecuado entre el aparato de medida de deformaciones (explicado en el apartado 4.4) y la probeta, se inserta un terminal metálico en las tapas superior e inferior del molde (Figura 4.4). Este terminal de acero galvanizado, no es otra cosa que un tornillo de unos 4cm que cortamos con una sierra para conseguir la medida deseada. Una de las partes del tornillo que adherida a la probeta cuando se endurece el mortero. Cabe añadir que la inclusión de este terminal, no afecta a los resultados obtenidos.



Figura 4.4 Terminales metálicos (izquierda) y de moldes listos para su llenado (derecha)

Con los moldes preparados, se inicia la fase de llenado para confeccionar las probetas. Este proceso se dividirá en cuatro fases de llenado como se explica a continuación:

- Se retira la tapa superior del molde y, en su lugar, se coloca un pequeño cuello de llenado para favorecer el proceso. Se vierte mortero dentro del molde con la ayuda de una espátula hasta llegar a $\frac{1}{4}$ del nivel del molde. Se toma una varilla metálica con la que se aplican 20 golpes en el fondo del molde, de esta manera se compacta la mezcla (Figura 4.5(a)).
- Seguimos echando mortero en el molde hasta completar $\frac{1}{2}$ de la altura. De nuevo, aplicamos 20 golpes con la varilla en el fondo. Además, contamos con una caja metálica que golpeamos con un martillo, así conseguimos un resultado de compactación similar al de una mesa vibratoria. Así pues, aplicamos otros 20 golpes con el martillo sobre la caja metálica y se compacta el mortero (Figura 4.5 (b)).
- Continuamos vertiendo mortero, esta vez hasta $\frac{3}{4}$ del nivel del molde y damos otra vez 20 golpes a la base del molde con la varilla metálica (Figura 4.5(c)).
- Por último, llenamos por completo el molde sumando un volumen extra de mortero para poder enrasar bien la superficie, contando que al compactar bajará el nivel. Realizamos 20 golpes con la varilla, y 20 más sobre la caja metálica para compactar correctamente todo el hormigón. Se retira el cilindro de llenado y se coloca la tapa (Figura 4.5 (d)).

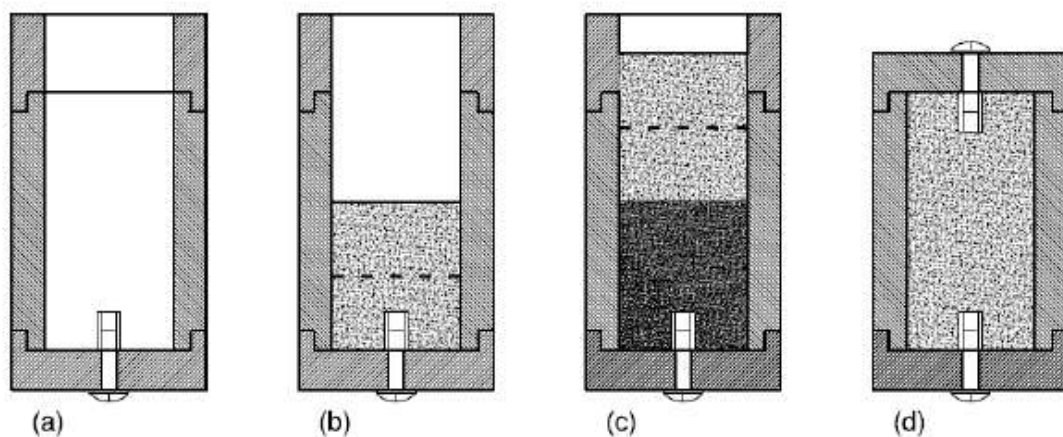


Figura 4.5 Representación gráfica del proceso de llenado de moldes cilíndricos. Figura proporcionada por Liaudat, J.

Curado inicial

Una vez se terminan de llenar los moldes, se introducen en un recipiente que actúa de cámara húmeda donde se curan durante 24-48 horas a temperatura ambiente (23°C aprox.). Dentro de este recipiente, la temperatura se mantiene prácticamente constante y la humedad relativa (HR) es mayor del 95%, ya que tiene una tapa interior que separa el recipiente en dos partes: la parte inferior se llena de agua, y la parte superior contiene las probetas.



Figura 4.6 Fotografía de cámara húmeda

Desmolde de probetas

Pasada la fase de curado inicial, se procede a desmoldar las probetas. Primero de todo, se extraen los tornillos de las tapas superior e inferior quedando el terminal metálico incrustado en la probeta.

Se prosigue con la separación del cilindro principal del hormigón. Para ello utilizamos una prensa vertical de desplazamientos controlados que empuja la probeta desde un extremo liberándola del molde. Justo en el momento de acabar el desmolde, tomamos medidas de diámetro y longitud de cada probeta.

Finalmente, marcamos la probeta con su número correspondiente (Tabla 4.1) y realizamos una señal para diferenciar la cara superior. Una vez completada la elaboración de las probetas, podemos comenzar con el ensayo.

Como hemos dicho, este proceso se realiza dos veces (uno para cada muestra). En ambos casos, se registra la temperatura ambiente en el mismo momento que se realiza la mezcla, el operario, el día y la hora correspondientes.

4.4. Metodología de ensayo

En el siguiente apartado, se explica de manera detallada todos los procedimientos seguidos para desarrollar el ensayo y el instrumental necesario para desarrollarlo.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Como se ha explicado, el ensayo consiste en dos etapas: una etapa de curado a temperatura controlada a 23°C, y una etapa de exposición en el horno a 60°C. En ambos periodos, las probetas permanecen sumergidas en un baño de solución alcalina 1M *NaOH* dentro de un recipiente de polipropileno con cierre hermético (Figura 4.7), impidiendo pérdidas de agua por evaporación. Este baño permite unas condiciones de saturación completa y que la concentración sea suficiente para desarrollar la RAS. Dentro de los recipientes, las probetas están sujetas por un soporte a medida que permite el contacto de la solución por toda su superficie. En cada recipiente se colocan dos probetas y éstos se marcan acorde la Tabla 4.1.



Figura 4.7 Probetas en baño de solución alcalina dentro de recipiente

Inmediatamente después de desmoldar, las probetas se sumergen en este baño y se esperan 30 minutos antes de su primera medida de ensayo. Se hace esto para asegurar que la temperatura de la probeta es la de ambiente y no superior debido al calor de hidratación del cemento.

La etapa de exposición debe durar un mínimo de 28 días desde que se entra en el horno, y según la cronología de la Tabla 4.5, se realizan 3 medidas semanal durante el primer mes y luego pasamos a 1 semanal. El ensayo finalizará cuando se observe que las curvas se estabilizan (se muestre una tendencia constante).

Instrumentos de medida

Los parámetros que se tienen en cuenta para el desarrollo de los ensayos de expansión libre son los siguientes:

- Temperatura ambiental
- Longitud de la probeta
- Peso
- Temperatura del horno

Todo este ensayo se lleva a cabo en una sala de temperatura controlada dentro del mismo laboratorio de geotecnia. La temperatura ambiental se mide con un termómetro de mercurio colocado dentro de la sala.

La longitud de la probeta se determina con un pie de rey. Esta medida solamente se realiza al desmoldar, al finalizar el curado y al finalizar el ensayo. El valor reportado será el promedio de las tres dimensiones.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

La variación de longitud de la probeta se mide utilizando un comparador analógico sobre un marco de medición (Figura 4.8-Izquierda). Antes de realizar la primera medida, se utiliza una barra de calibración de invar⁵ para tomar de referencia la medida registrada como nuestro valor 0 (en nuestro caso la medida de calibrado cuando está colocada la barra invar es 662). El comparador tiene una resolución de 0,002mm, por tanto para obtener el valor real de la longitud deberemos multiplicar en número de divisiones registrado por este valor.



Figura 4.8 Aparatos utilizados para el registro de medidas. Izquierda: comparador analógico sobre marco de medición. Derecha: balanza electrónica.

El peso de la probeta se mide con una balanza electrónica que tiene una precisión de 0,001g (Figura 4.8-Derecha). Antes de poner la probeta sobre la balanza, se seca rápidamente la superficie de la probeta para evitar excesos de solución pero ésta continua saturada.

En cuanto a la temperatura del horno, solo se mide durante la etapa de exposición. Se adquieren los datos de manera continua con la ayuda de un termopar colocado dentro del horno que envía los registros al ordenador. La temperatura dentro del horno permanece siempre a $60 \pm 1^\circ\text{C}$.

Asimismo, para cada medida, se apunta la fecha, el día, la hora y el operador que realiza las mediciones.

Proceso de adquisición de datos

En esta clase de experimentos, es importante seguir una rutina a la hora de realizar las mediciones. Durante la exposición, la probeta se saca del horno para medir y a cada segundo que está fuera la probeta se va enfriando y secando. Por tanto, cada segundo varían los resultados, debido a eso es determinante seguir un riguroso orden. Se puede reducir la probabilidad de errores si las medidas son realizadas por el mismo operador y a la misma hora del día.

⁵ Invar o *FeNi36*, es una aleación de acero con un bajo coeficiente de dilatación generalmente empleado en fabricación de piezas de precisión y elementos de medición de longitud.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

Tanto durante la fase de curado como la exposición los parámetros medidos como el procedimiento es el mismo

Paso 1. Ponemos a cero el dial del comparador utilizando la barra de invar. Colocamos papel sobre la mesa para secar posteriormente las probetas.

Paso 2. Apuntamos la fecha, el día, la hora, la temperatura ambiente y el operador. Es necesario usar guantes de protección para manipular las probetas ya que se encuentran en un baño de solución muy alcalina y podríamos sufrir daños en la piel.

Paso 3. Cogemos el primer recipiente y extraemos una probeta. Secamos brevemente su superficie con el papel y apuntamos el valor que se observa en el comparador. Dejamos la probeta momentáneamente en una bandeja.

Paso 4. Extraemos la otra probeta del mismo recipiente. Secamos y medimos su longitud con el comparador de la misma manera. Colocamos sobre la bandeja junto a la otra probeta.

Paso 5. Se pesan las probetas en la balanza por separado, siguiendo el mismo orden de extracción.

Paso 6. Se devuelven las probetas dentro del recipiente de plástico con la misma ubicación.

Realizamos este mismo procedimiento para todos los recipientes. Una vez tomadas todas las medidas, se colocan los recipientes dentro del horno en el mismo orden en el que estaban.

Como se ha comentado en el apartado anterior, interfieren otros parámetros que se registran durante el ensayo. En la siguiente tabla se muestra la frecuencia de medida de cada uno de los parámetros definidos durante las diferentes etapas del ensayo.

Tabla 4.5 Frecuencia de registro de medidas de las distintas etapas del experimento

<u>Frecuencia</u>		Temperatura Ambiental	Dimensiones generales	Variación de longitud	Peso	Temperatura Horno
P: Puntual C: Continua 1: una vez por semana (Mi) 3: tres veces por semana (L/Mi/V)						
Etapas	Elaboración de probetas	P				
	Desmolde/Inicio curado	P	P	P	P	
	Curado – 1ra semana	1		3	3	
	Curado – hasta finalizar	1		1	1	
	Fin curado/ Inicio baño a 60°C	P	P	P	P	C
	Primer día baño 60°C	P		P	P	C
	Baño 60°C - Primeras cuatro semanas	3		3	1	C
	Baño NaOH 60°C - hasta finalizar	1		1	1	C

	Fin baño NaOH 60°C	P	P	P	P	C
--	--------------------	---	---	---	---	---

Cálculos

A partir de los parámetros medidos, fueron desarrolladas una serie de expresiones matemáticas que ayudan a visualizar las curvas de deformaciones y variaciones de peso (Ec. 4.1 y Ec. 4.2). De esta manera, nos es más sencillo interpretar y discutir cuál es el comportamiento de las probetas ante la RAS.

$$\varepsilon^a = \frac{l - l_i}{L} \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$\pi^a = \frac{p - p_i}{p_i} \quad \text{Ec. 4.2}$$

ε^a : Deformación específica de las probetas cilíndricas durante la etapa de curado [%]

π^a : Variación específica del peso de las probetas durante la etapa de curado [%]

l : Longitud medida en el edómetro [μm]

l_i : Longitud inicial medida en el comparador [μm]

L : Longitud medida con pie de rey después del desmolde [μm]

p : Peso medido en la balanza [g]

p_i : Peso inicial medido al desmoldar [g]

Se calculó también coeficiente de expansión térmica (Ec. 4.3) a partir de las expansiones sufridas por las probetas después de las 24 horas en solución alcalina a 60°C. El coeficiente de expansión térmica permite evaluar la metodología de medición empleada.

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \left(\frac{l_0 - l_{28}}{L} \right) \quad \text{Ec. 4.3}$$

α : Coeficiente de dilatación térmica de expansión térmica lineal de las probetas [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

l_0 : Longitud medida en el comparador después de las 24h en solución [μm]

l_{28} : Longitud medida en el comparador después de etapa de curado [μm]

ΔT : Diferencia entre temperatura de exposición y temperatura de curado [$^{\circ}\text{C}$]

El desarrollo de esas expresiones fue proporcionado por el tutor J. Liaudat, no forma parte de esta tesis.

4.5. Resultados

Etapas de Curado

La etapa de curado viene justo después del curado inicial (24 horas después del desmolde). Como se ha dicho, esta etapa se desarrolla en una sala de temperatura controlada a 23°C para reducir los efectos provocados por la variación de temperatura ambiente en nuestros registros de medidas.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

La etapa de curado dura 28 días a partir del día de elaboración de las probetas. , y según se indica en la Tabla 4.5, se realizan 4 medidas más. A partir de los registros de longitud y peso, y utilizando las expresiones Ec. 4.1 y Ec. 4.2, somos capaces de representar las gráficas siguientes:

- Muestra de fracción 6-20mm:

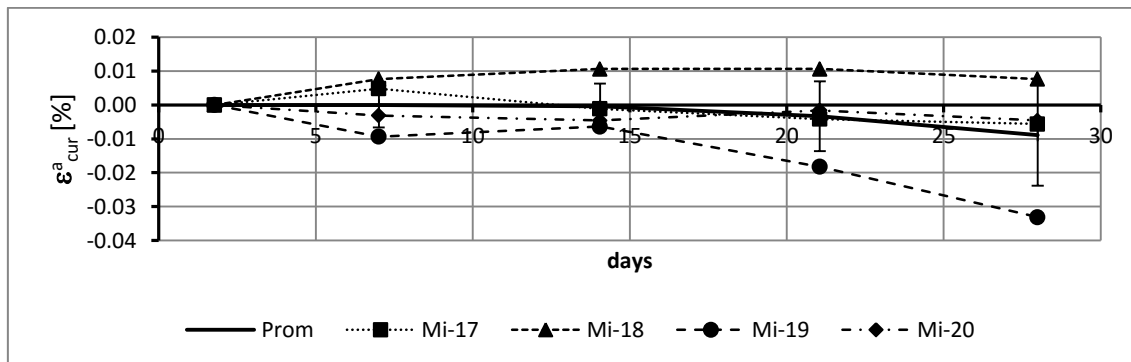


Figura 4.9 Deformación versus tiempo durante la etapa de curado de la muestra 6-20mm.

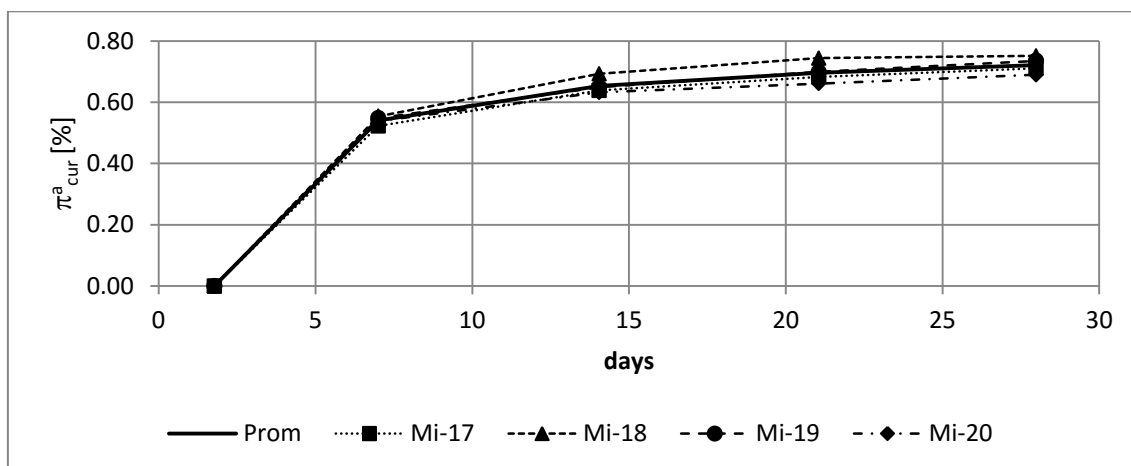


Figura 4.10 Variación específica del peso durante etapa de curado muestra 6-20mm

- Muestra de fracción 100mm:

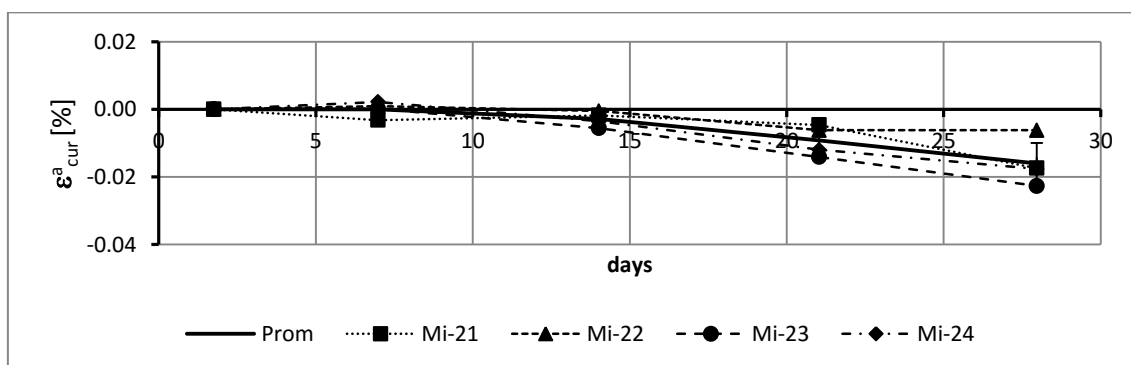


Figura 4.11 Deformación versus tiempo durante la etapa de curado de la muestra 100mm

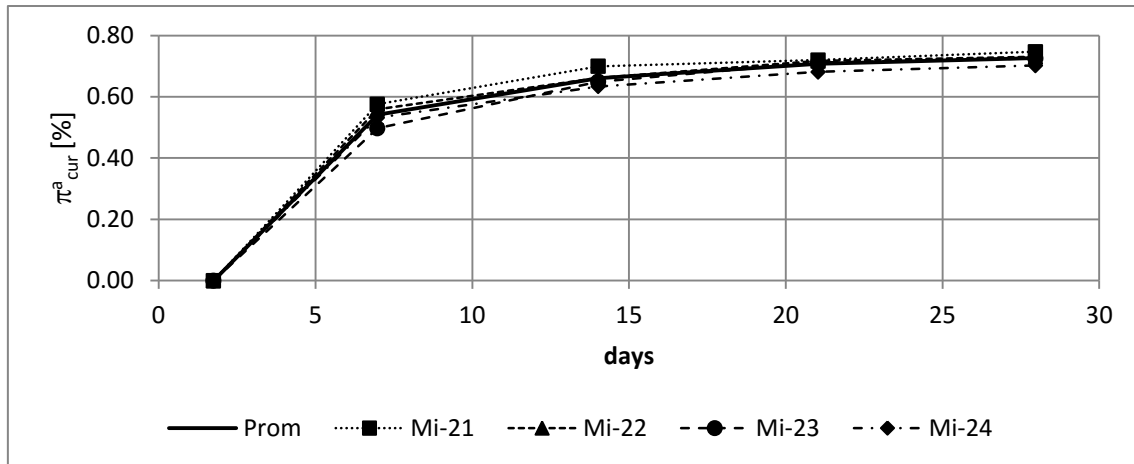


Figura 4.12 Variación específica del peso durante etapa de curado muestra 100mm

Primeramente se observa un claro crecimiento de peso que se comienza a estabilizar a partir de los primeros 5 días, llegando a un máximo en ambos casos de aproximadamente 0.7%.

En cuanto a las deformaciones, se observa una clara contracción debida seguramente a la hidratación del cemento. Se muestra una gran dispersión a causa de que se está trabajando con valores muy pequeños. Cabe apuntar que la dispersión en las medidas de deformación es ligeramente mayor para la 6-20mm.

Etapas de Exposición

La etapa de exposición es la continuidad de la última medida de curado. Como se ha dicho, en esta etapa los recipientes con las probetas se introducen en el horno a 60°C. En estas condiciones (temperatura y sumergidas en solución alcalina), los efectos de la RAS se aceleran para mostrar las máximas expansiones en un tiempo de ensayo relativamente corto.

Con los registros de longitud y peso y las expresiones Ec. 4.1 y Ec. 4.2, somos capaces de representar las gráficas siguientes.

Se toma como medida cero, los registros tomados una vez la probeta ha pasado 24 horas dentro del horno por lo que no hay dilatación térmica en las gráficas siguientes.

- Muestra 6-20mm:

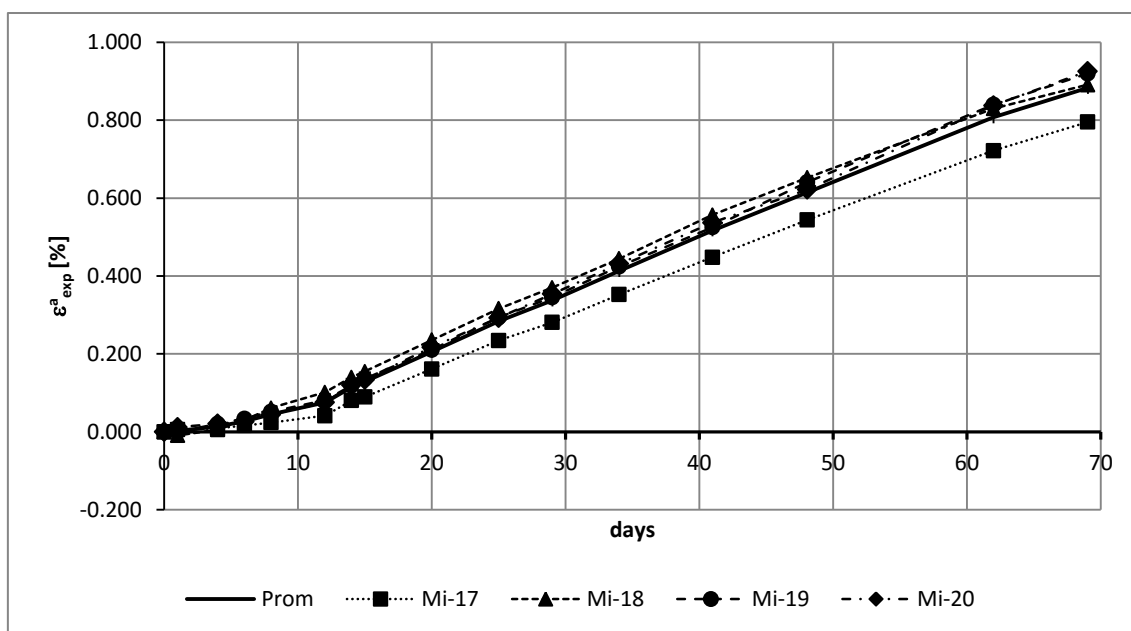


Figura 4.13 Deformación versus tiempo durante la etapa de exposición de la muestra 6-20mm.

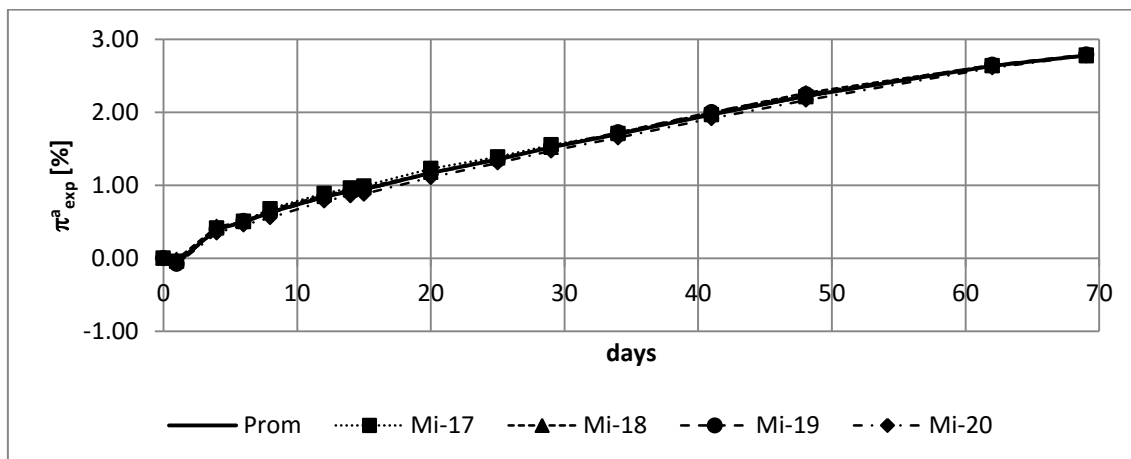


Figura 4.14 Variación específica del peso durante etapa de exposición muestra 6-20mm

- Muestra 100mm:

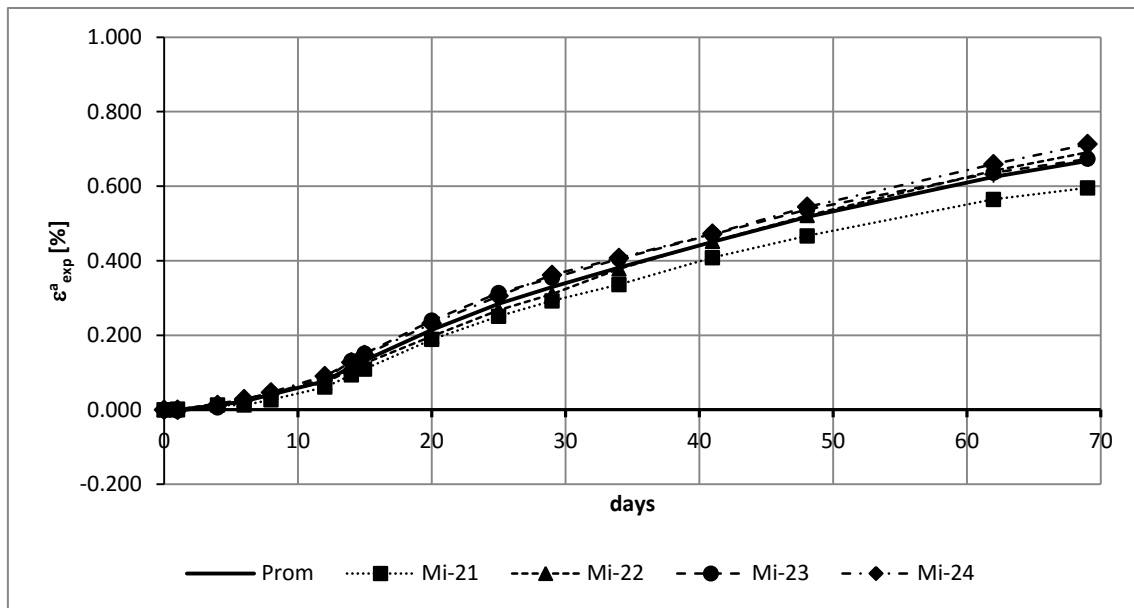


Figura 4.15 Deformación versus tiempo durante la etapa de exposición de la muestra 100mm

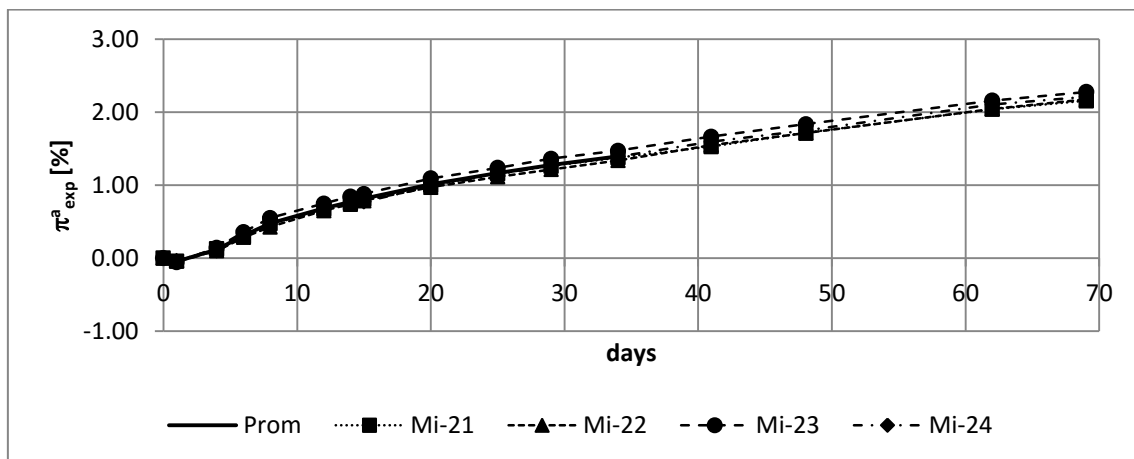


Figura 4.16 Variación específica del peso durante etapa de exposición muestra 100mm

Si observamos detenidamente las curvas de variación de peso, se muestra que primeramente las muestras pierden algo de peso puntualmente, seguramente esto se debe a la brusca subida de la temperatura que pasa de 23°C a 60°C. Al aumentar la temperatura se acelera la hidratación del cemento, por eso se produce la pérdida de peso inicial. En cuanto la temperatura se estabiliza, la RAS coge fuerza se ve claramente una tendencia a aumentar el peso y poco a poco la tasa de crecimiento va siendo menor a medida que avanza el tiempo.

En cuanto a las deformaciones, se aprecia que las muestras tardan en expandir al principio pero poco a poco su tasa de deformaciones va creciendo hasta conseguir una pendiente prácticamente constante. De la misma manera, se observa que la muestra 6-20mm expande más que la muestra 100mm.

Registro completo

Se agrupan los registros de medidas de las dos etapas de ensayo para visualizar el progreso completo de las probetas en el experimento.

Variación específica del peso

En primer lugar se va a estudiar la representación de los registros obtenidos según la variación específica de peso:

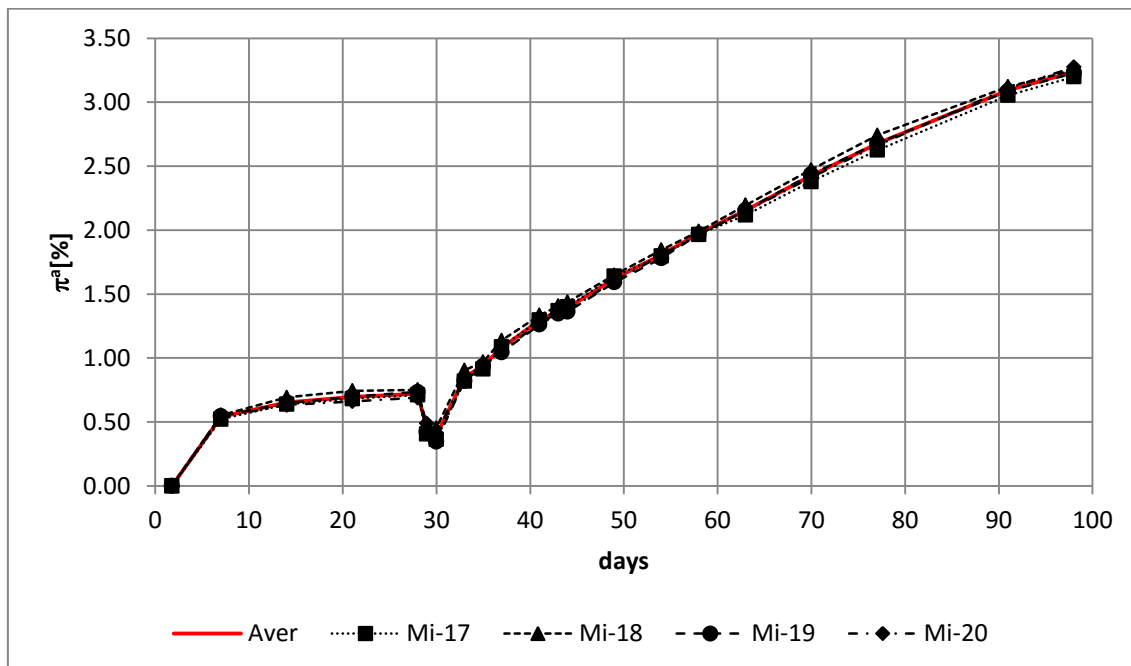


Figura 4.17 Variación específica del peso muestra 6-20mm (ensayo completo)

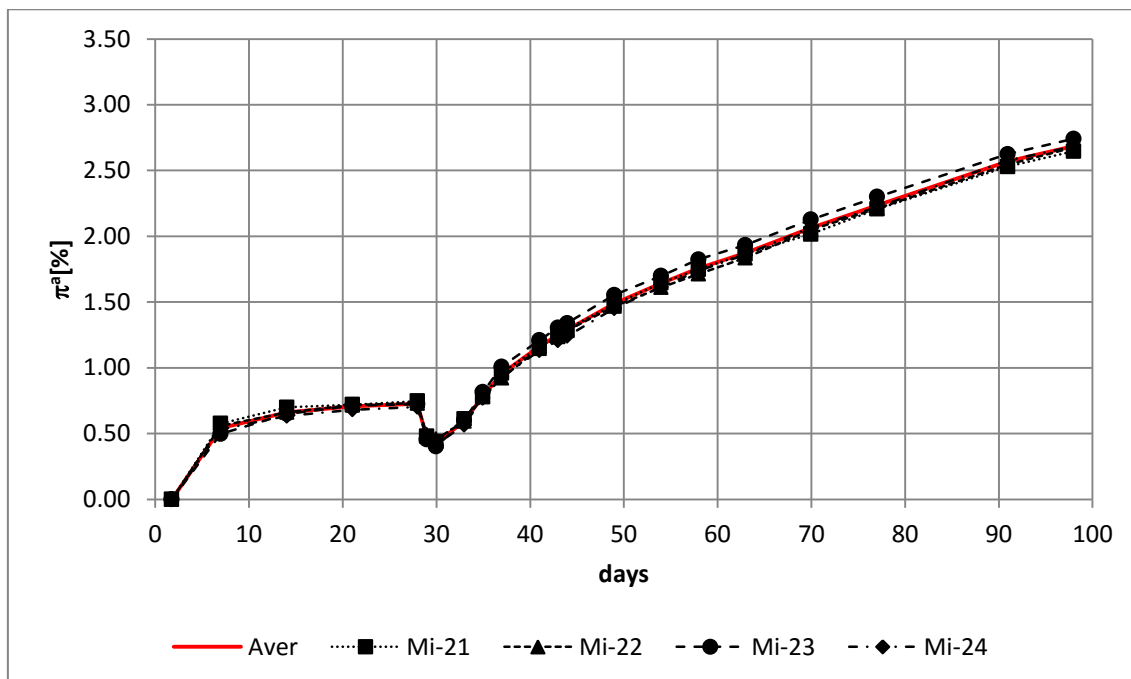


Figura 4.18 Variación específica del peso de la muestra 100mm (ensayo completo)

A continuación se muestran los registros de la primera muestra que se de 6-20mm trajo para comparar su comportamiento. Información proporcionada por el tutor J. Liaudat, el ensayo no forma parte de esta tesina.

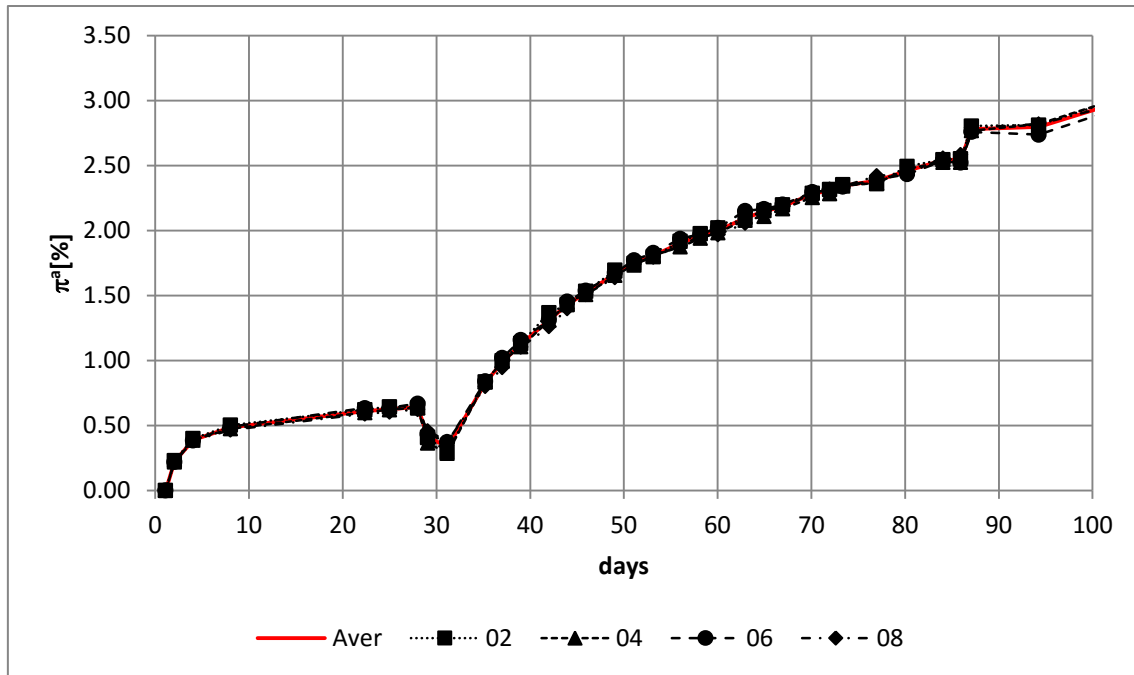


Figura 4.19 Variación específica del peso primer muestra de referencia 6-20mm (ensayo completo).
Fuente J. Liaudat.

Según las curva representadas (Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19), se aprecia un patrón general de aumento de peso durante el inicio del curado. A medida que pasan los días, se estabiliza el crecimiento hasta el final del curado hasta que la probeta se introduce en el horno y comienza la exposición. Hay un claro descenso de peso debido a la subida drástica de la temperatura. En cuanto la temperatura de las probetas se estabiliza a 60°C, el peso registra un nuevo aumento que acaba manteniendo una tasa constante.

Deformación específica

En segundo lugar se va a estudiar la representación de los registros de obtenidos según la deformación específica:

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

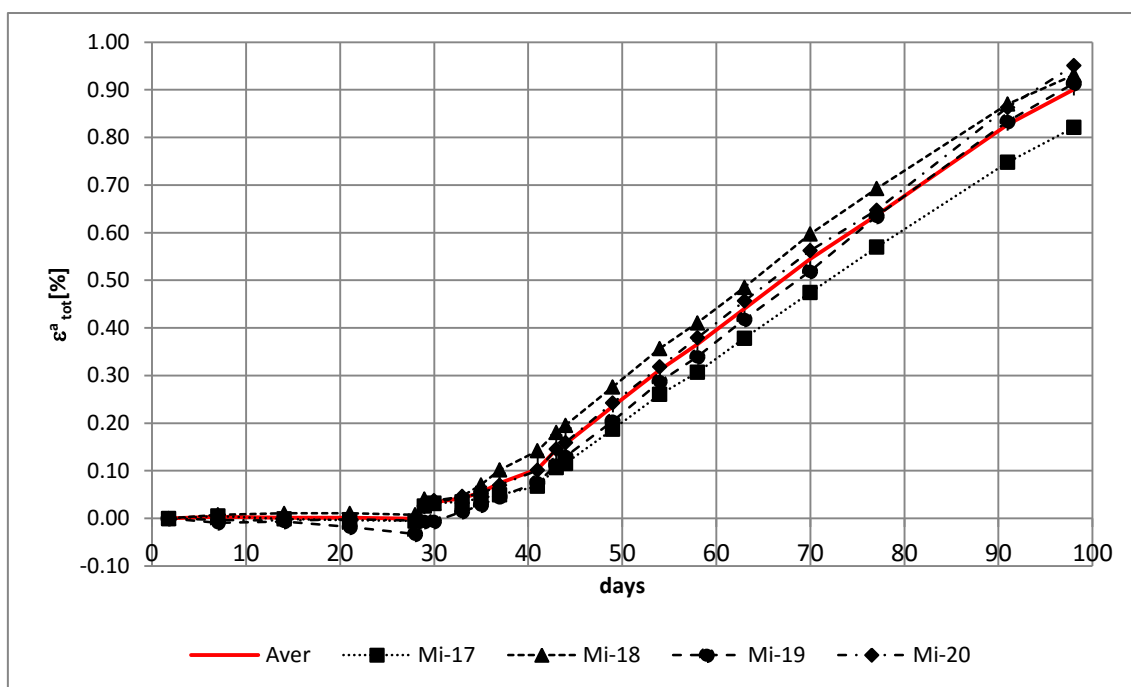


Figura 4.20 Deformación versus tiempo muestra 6-20mm (ensayo completo)

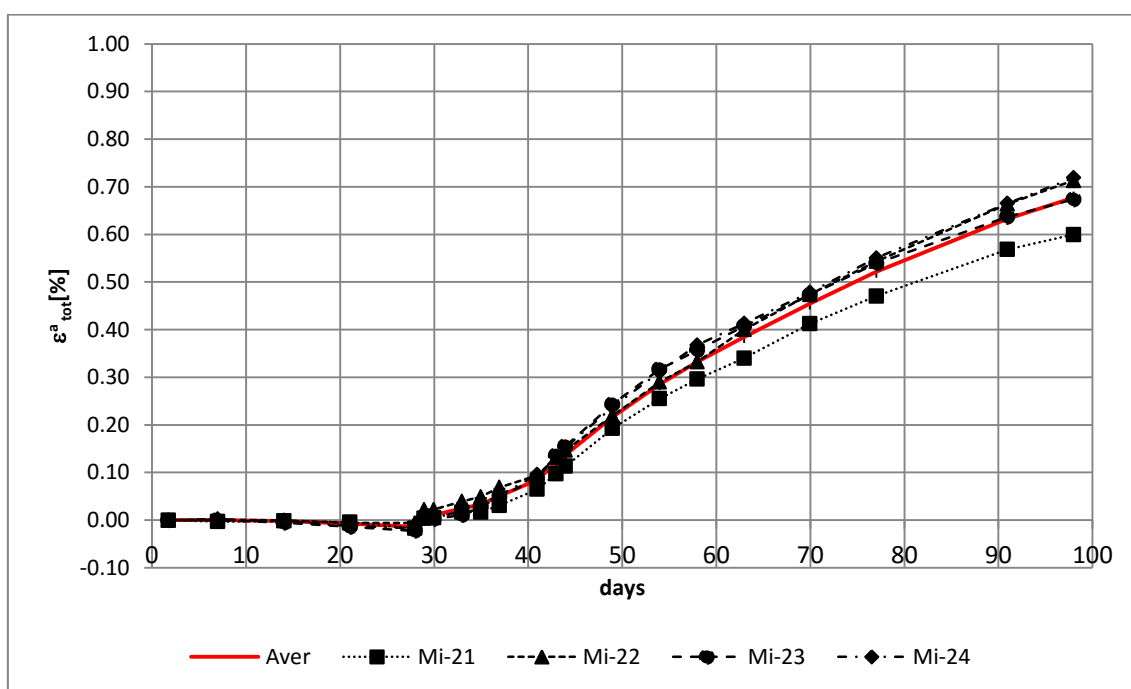


Figura 4.21 Deformación versus tiempo muestra 100mm (ensayo completo)

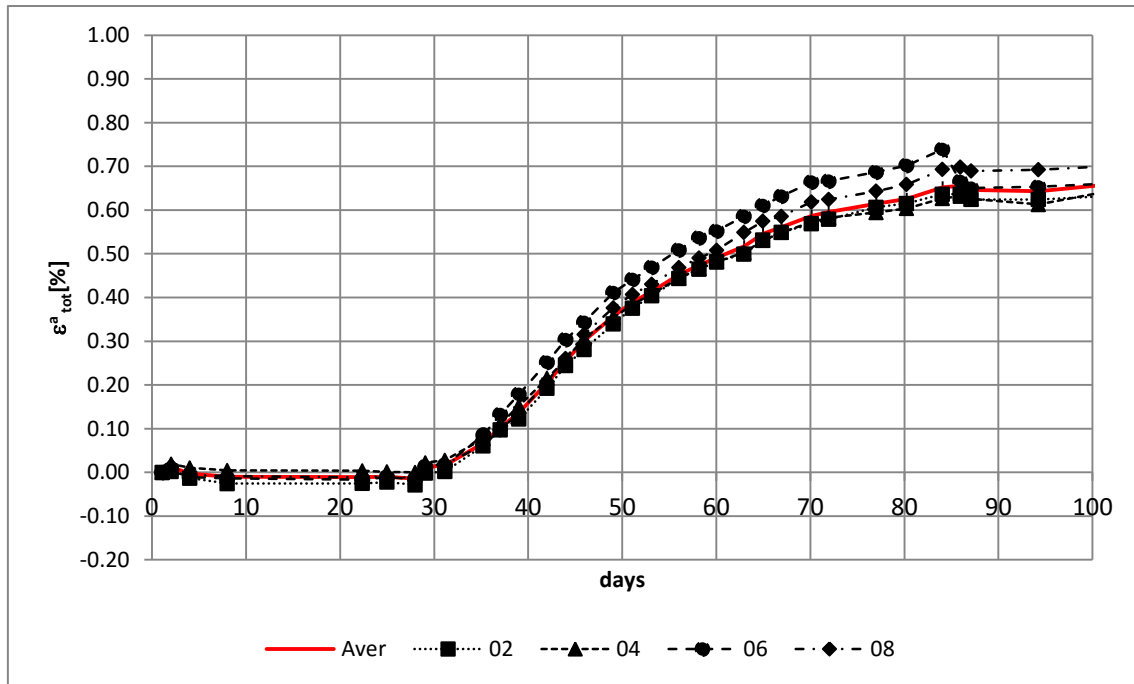


Figura 4.22 Deformación versus tiempo de primera muestra de referencia 6-20mm (ensayo completo).
Fuente J. Liaudat.

Según las curvas representadas (Figura 4.20, Figura 4.21 y Figura 4.22), en los primeros dos días se produce una primera expansión puntual seguramente debida a la saturación de la probeta. En cuanto la muestra llega a su máximo de expansión durante el curado, se registra una pequeña contracción de la probeta que se corta a los 28 días. De manera análoga a la variación de peso, se ve un salto brusco en las medidas debido al cambio repentino de temperatura cuando las muestras entran en el horno. El aumento de la temperatura en la probeta provoca una significativa expansión. Una vez en la etapa de exposición, las deformaciones van creciendo cada vez más hasta estabilizarse en una tasa de expansión constante.

Relación peso-deformación

En tercer lugar se ha representado la relación existente entre la variación del peso y la deformación específica de las probetas testadas:

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

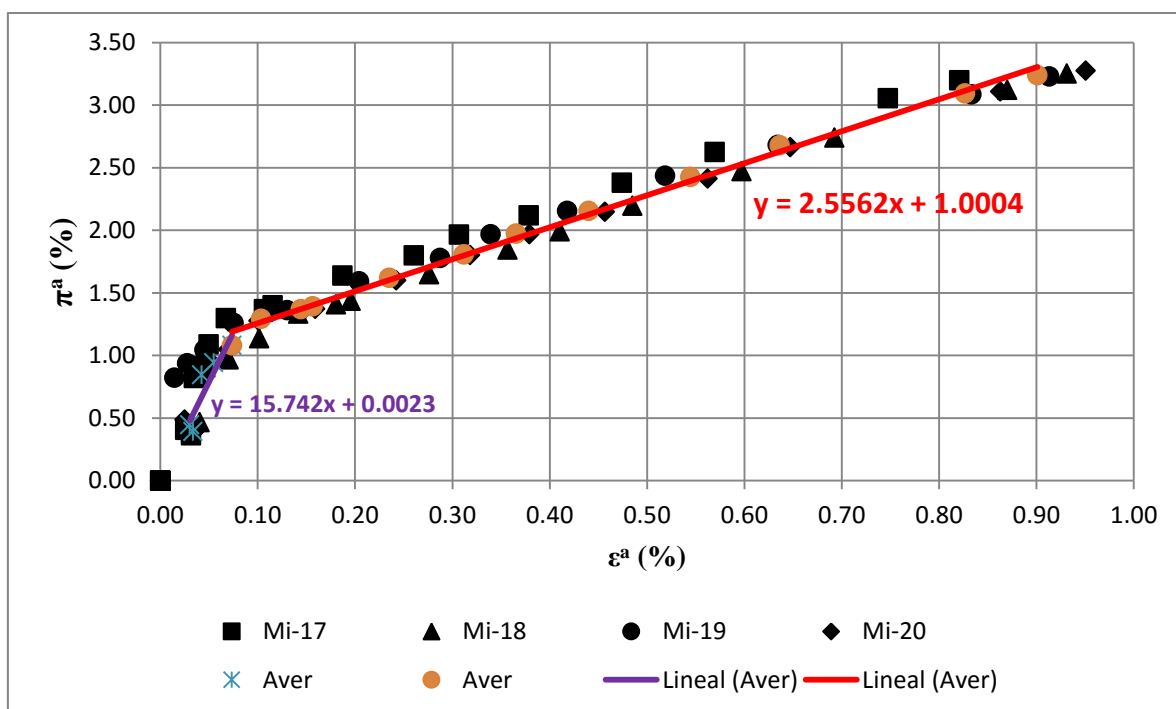


Figura 4.23 Relación peso-deformación durante exposición muestra 6-20mm

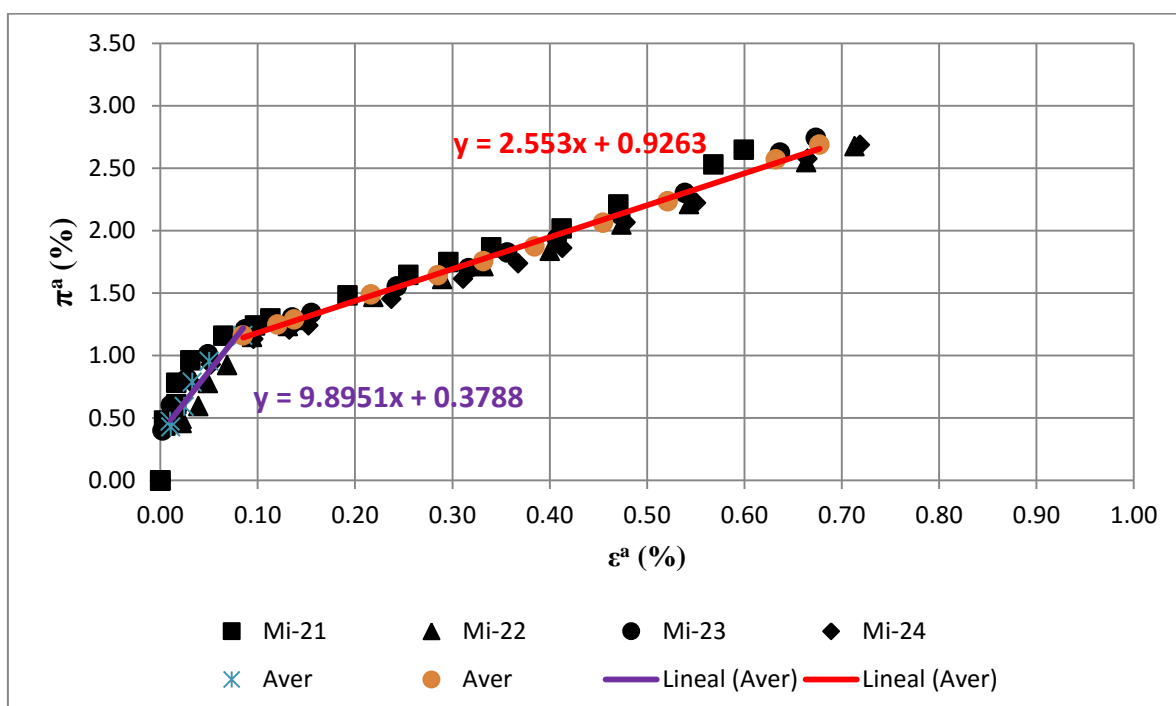


Figura 4.24 Relación peso-deformación durante exposición muestra 100mm

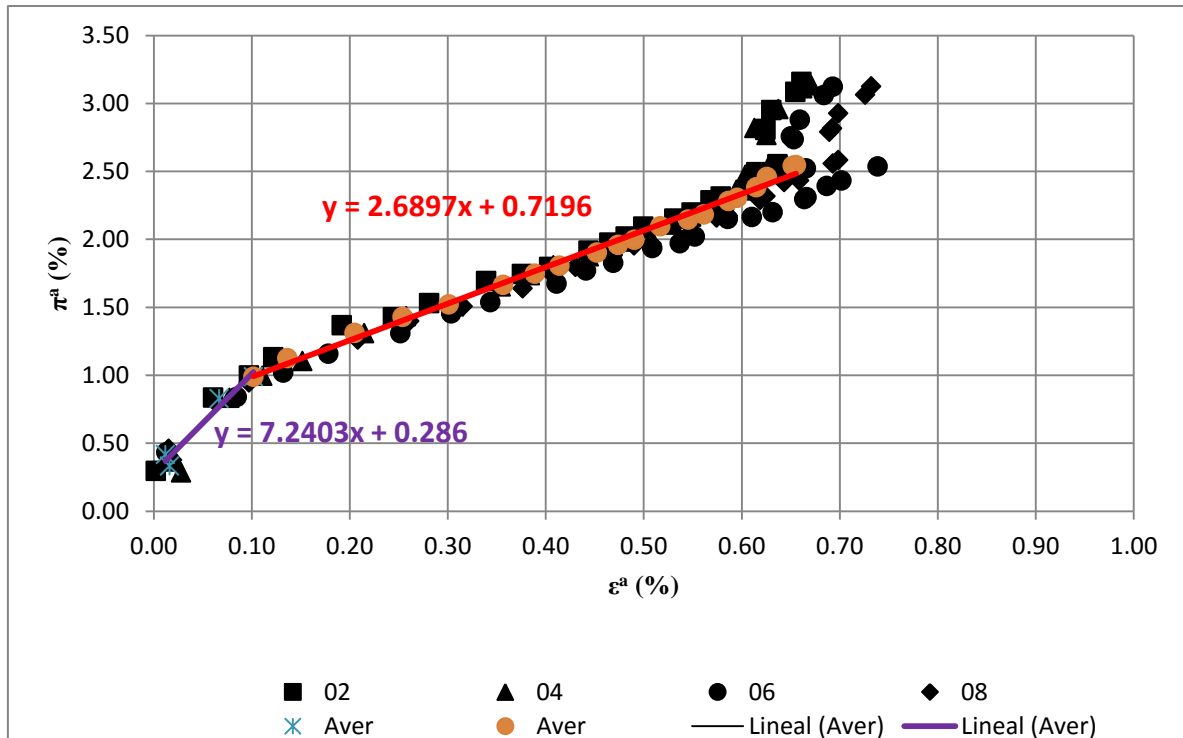


Figura 4.25 Relación peso-deformación durante exposición de primera muestra de referencia 6-20mm (ensayo completo). Fuente J. Liaudat.

Estas curvas se representan solamente para la fase de exposición, durante los primeros días de exposición, los registros de datos se alinean como se muestra en la Figura 4.25 con una línea de color violeta. Más adelante en la fase de exposición, donde se consigue ver que los puntos se alinean con otra pendiente distinta, esto se ve con la línea de tendencia de color rojo.

La interpretación es que existe una relación lineal entre la variación de peso y las deformaciones que sufre la probeta. La cual tiene un punto de inflexión cerca del valor 0,1% de deformación.

Probetas afectadas

Se ha recogido un seguido de fotografías donde se manifiesta el resultado visible de la RAS en las probetas ensayadas:



Figura 4.26 Capturas de probetas con árido basáltico

En las imágenes se muestran claramente las grietas por causa de la RAS y las exudaciones del gel expansivo. Estas fotografías fueron tomadas a los 98 días del ensayo.

4.6. Discusión de resultados

Gracias a las curvas representadas, a continuación podemos realizar un seguimiento completo del ensayo y analizar cuál ha sido el comportamiento de las muestras.

Variación específica del peso

En esta imagen se ve aún más claro el efecto de la posición en el horno comentado en el apartado anterior (Apartado 4.5). Durante la etapa de curado, las dos muestras registran valores similares (Figura 4.17 y Figura 4.18), en cambio en la etapa de exposición, se registra una tasa de ganancia de peso mayor en la muestra 6-20mm que se va acelerando hasta llegar a un máximo de 2.7%, a diferencia de los 2.2% de la muestra 100mm. La posición en el horno de la muestra 6-20mm, comporta una temperatura mayor, acelerando así los efectos producidos por la reacción.

Deformación específica

Como ocurre en el caso del peso, hay una diferencia en el registro de deformaciones de una muestra a la otra. La muestra 6-20mm presenta una expansión más rápida debido a que está a una temperatura algo más alta que la muestra 100mm. La muestra 6-20mm acaba registrando un máximo de 0.75% frente al máximo de 0.62% de las otras probetas.

En comparación a la primera muestra 6-20mm de referencia, tanto el comportamiento como los picos de registros son similares a las otras dos muestras ensayadas (6-20mm y 100mm). Se muestran algunas diferencias en el crecimiento de las curvas, seguramente debido a que el operador de la muestra de referencia no era el mismo que para las otras dos. En todo caso se sugiere, que todas las muestras tienen el mismo comportamiento reactivo.

Relación peso-deformación

Claramente, la muestra 6-20mm crece más rápidamente de peso que la muestra 100mm, ver Figura 4.23 y Figura 4.24. Este efecto puede ser una consecuencia de la diferencia de altura a la que están colocados los recipientes dentro del horno. Es decir, hacia la mitad del ensayo nos dimos cuenta de que los valores eran distintos y deducimos que podía deberse a que la temperatura dentro del horno no es homogénea. Los recipientes están colocados en dos niveles distintos dentro del horno, con una diferencia de altura de unos 30cm; sabemos que el aire caliente tiende a subir, por lo que significa que los recipientes colocados en el nivel superior (muestra 6-20mm) tienen una temperatura algo más alta que las del nivel inferior (muestra 100mm). Estas probetas son muy sensibles a la temperatura, por lo que una diferencia de pocos grados, se refleja claramente en los registros de medidas.

Comparando los resultados de los ensayos realizados en esta tesina (Figura 4.23 y Figura 4.24), con la muestra 6-20mm de referencia (Figura 4.25), se observa que el comportamiento es similar. Todas las muestras muestran una tendencia inicial con una pendiente mayor (línea violeta), a partir del 0,1% de deformación la línea de tendencia tiene una pendiente menor (línea roja). Se observa que los valores de las probetas 6-20mm de referencia se asemejan más a los de la muestra 100mm, esto puede deberse a que estuvieran sometidas a una temperatura muy similar durante la etapa de exposición.

Como conclusión, se manifiesta que las tres muestras de árido basáltico acabaron mostrando una expansión similar debida a la RAS, y que por tanto, tienen la misma reactividad. De esta manera, se puede decir que los ensayos han sido realizados con éxito y en consecuencia, se sugiere que el árido sería adecuado para realizar futuros ensayos de expansión confinada en la AAR-TM.

5. Conclusiones y propuestas

A partir de las etapas realizadas para completar este trabajo, se ha profundizado en el conocimiento de las expansiones por RAS en el hormigón. Se ha definido dicha reacción desde el aspecto físico-químico hasta los efectos visibles que provoca sobre estructuras de este tipo.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

En el desarrollo de la parte experimental de este trabajo, se ha comprendido como llevar a cabo la elaboración de probetas y también, los parámetros importantes que intervienen en la dosificación. El tiempo de trabajo en el laboratorio, nos ha ayudado a ampliar los conocimientos de metodología de elaboración de ensayos y a la adquisición de técnicas de laboratorio. Cabe añadir que mediante la preparación y utilización de la AAR-TM, se han obtenido conocimientos sobre sistemas hidráulicos, sistemas eléctricos, electrónica y funcionamiento de software de adquisición de datos.

Se ha llevado a cabo con éxito un ensayo de expansión confinada utilizando la AAR-TM, para observar las expansiones producidas por la RAS en probetas elaboradas con áridos reactivos. Con los resultados que se han obtenido y los resultados de ensayos previos proporcionados por los tutores, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Tanto las probetas de control como las activas, cuando se aplica un estado tensional, presentan una primera contracción similar debido al efecto *creep*, deformación por fluencia lenta.
- En las probetas activas se manifiestan expansiones por RAS. Se observa que los valores de expansión para las direcciones más cargadas son menores a las direcciones que tienen tensiones inferiores. Así pues, se ve que deformación volumétrica es menor a medida que la tensión media de las probetas se incrementa. Se sugiere que la hipótesis propuesta por (Multon & Toutlemonde, 2006) no se cumple.

Los ensayos realizados hasta el momento con la AAR-TM, no han aportado información suficiente para formular conclusiones definitivas. Esto es debido a que son pocos los ensayos llevados a cabo, y también a que no se ha usado un árido reactivo natural.

En cuanto a los ensayos de expansión libre, con probetas elaboradas con áridos basálticos, se concluye positivamente que las dos muestras ensayadas se caracterizan con el mismo comportamiento reactivo. A pesar de los pequeños inconvenientes que aparecieron durante los ensayos, las probetas acabaron mostrando una tasa de expansión similar en todos los casos. En consecuencia, se observa que el árido sería adecuado para realizar ensayos en la AAR-TM.

Finalmente, se presentan una serie de propuestas de ensayo y de mejora de la metodología experimental:

- Continuar los ensayos en la AAR-TM, aplicando diversos estados tensionales de carga utilizando probetas cúbicas elaboradas con vidrio triturado. Una vez la metodología se haya probado, realizar los ensayos con probetas elaboradas con el árido natural caracterizado.
- Se debería contar con un horno con ventilación, a modo de obtener resultados más fiables en los ensayos de expansión libre, de manera que la temperatura en su interior fuera más homogénea. Así reduciríamos las variaciones en los registros de medidas a causa de diferencias en la temperatura de exposición.
- En la AAR-TM, contar con un calentador bien aislado, tanto para reducir pérdidas de energía como para disminuir la probabilidad de fallo del dispositivo. Además, instalar un depósito de líquido hecho con un material más resistente como acero inoxidable.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

- Realizar los ensayos de AAR-TM en un laboratorio de temperatura controlada para reducir su influencia sobre los resultados, ya que pequeñas variaciones en la temperatura ambiente provocan perturbaciones significativas en los registros.

Referencias

- Acosta Collell, I. (2012). *Calibración y puesta en marcha de una nueva máquina de ensayo para hormigón afectado por la reacción álcali-árido*. UPC. Trabajo Final de Grado. URL: <http://hdl.handle.net/2099.1/16525>.
- Barreto Santos, M., Brito, J. & Santos Silva, A. (2009). Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(2), 141-152.
- Batic, O., Maiza, P. & Sota, J. (1994). Alkali Silica Reaction in Basaltic Rocks NBRI Method. *Cement and Concrete Research*, 24(7), 1317-1326.
- Bulteel, D., Garcia-Diaz, E., Vernet, C., & Zanni, H. (2002). Alkali-silica reaction. A method to quantify the reaction degree. *Cement and Concrete Research*, 32, 1199-1206.
- Committee on materials for concrete dams. ICOLD. (1991). *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Dams. Review and recommendations. Bulletin 79*. Paris.
- Farny, J.A. & Kerkhoff, B. (2007). Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate. (Skokie, Ed.) *Portland Cement Association, IS413.02*, 25.
- Federal Institute for Materials Research and Testing-Germany. (s.f.). Recuperado el 26 de mayo de 2016, de http://www.bam.de/de/_pic_u_film/web/kompetenzen/abteilung_7/fg71/fg71_fotos/fg71_netzrissbildung.jpg
- Fernandes, I. (2009). Composition of alkali-silica reaction products at different locations within concrete structures. *Materials Characterization* 60, 655-668.
- Fournier, B., Bérubé, M. A., Folliard, K. J. & Thomas, M. (2010). *Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures*. Final Report, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
- Jones, A.E.K. & Clark, L.A. (1998). The effects of ASR on the properties of concrete and the implications for assessment. *Engineering Structures*, 20(9), 785-791.
- LabSen. (2014). Recuperado el 10 de junio de 2016, de Laboratorio de Sensores e Instrumentación Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/LVDT/lvdt.pdf>
- Larive, C. (1998). *Apports Combinés de l'Experimentation et de la Modélisation à la Compréhension de l'Alcali-Réaction et ses Effets Mécaniques, Thèse de Doctorat*. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Lindgård, J., Andiç-Çakır, Ö., Fernandes, I., Rønning, T. F., & Thomas, M. D. (2012). Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. *Cement and Concrete Research*, 42, 223-243.
- Lukschová, Š. (2009). *Alkali-Silica Reaction of aggregates in real concrete and mortar specimen*. Charles University in Prague, Institute of Rock Structure and Mechanics, Praga.

Estudio experimental de la influencia del estado tensional en las expansiones por Reacción Álcali-Sílice en hormigón

- Martínez Estévez, A. (2014). *Estudio experimental de la expansiones por reacción álcali-sílice a nivel de la interfase pasta de cemento-agregado*. UPC. Treball Final de Grau. URL: <http://hdl.handle.net/2099.1/23737>.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Multon, S., & Toutlemonde, F. (2006). Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions. *Cement and Concrete Research*, 36, 912-920.
- Osorio, J. D. (Mayo de 2013). *Blog 360º en concreto*. Recuperado el Marzo de 2016, de <http://blog.360gradosenconcreto.com/reaccion-alcali-agregado-un-ensayo-importante-en-la-tecnologia-del-concreto/>
- Poyet, S., Sellier, A., Capra, B., Thèvenin-Foray, G., Torrenti, J.M., Tournier-Cognon, H. & Bourdarot, E. (2006). Influence of Water on Alkali-Silice Reaction: Experimental Study and Numerical Simulations. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J.H & Thomas M. (2015). Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 76, 130-146.
- Rocco, C., Maiza, P., Fava, C., Marfil, S. & Tobes, J. (2012). Estudio de reactividad alcalina potencial de basaltos procedentes de yacimientos ubicados en la mesopotamia argentina. *V Congreso Internacional de la AATH*. Bahía Blanca, Argentina.
- Stanton, T. E. (1940). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of American Society of Civil Engineers* 66, (págs. 1781-1811).
- Swamy, R. N. (1992). *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Blackie and Son Ltd.
- Zhang, C., Wang, A., Tang, M., Wu, B. & Zhang, N. (1999). Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, 29, 1393-1396.